

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26780413

研究課題名(和文) 知覚的・経験的・物理的な物体色の限界輝度の比較による物体色知覚メカニズムの解明

研究課題名(英文) Study of object-color perception mechanism by comparison between perceptual, empirical, and theoretical maximum luminance of object colors

研究代表者

福田 一帆 (Fukuda, Kazuho)

工学院大学・情報学部(情報工学部)・准教授

研究者番号：50572905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：視覚系は物体表面色を取りうる最大輝度分布と照明光の関係の物理特性を経験的に獲得して色知覚に適用しているという仮説に対して、知覚的・経験的・物理的な物体色最大輝度を比較する方法により検証をこころみた。その結果、知覚的な物体色最大輝度は、物理的な最大輝度であるオプティマルカラーに類似することが示された。これは仮説を支持する結果である。一方で、シーンの構成要素が花や葉などの自然物である場合は、抽象的なシーンよりも知覚的な最大輝度が低くなる結果が表れた。これらの結果を適用して、物体色知覚における照明光推定のための計算モデルの改良をおこなった。

研究成果の概要(英文)：This study compared perceptual, empirical, and theoretical luminance-chromaticity distribution of object colors, and examined our hypothesis that the visual system holds and uses luminance-chromaticity distribution of object colors. The results showed correlations of luminance-chromaticity distributions between the boundary of appearance mode and the theoretical limitation of object colors, which supports our hypothesis, and indicated the boundary on a natural image and abstract image was lower in luminance than that on an abstract image. On the contribution of these results, this study supported and improved our illuminant estimation model for object color perception.

研究分野：視覚情報処理

キーワード：色覚 色恒常性 物体色 分光反射率 オプティマルカラー

1. 研究開始当初の背景

物体表面色の知覚は物体自体の反射光の物理量からは推定できない。例えば、白い紙は日中の白色光の下でも、夕方の赤みのある光の下でも、その反射スペクトルの変化によらず同様に白色に知覚される。これは人間が照明光の影響を差し引いて物体色を知覚することを示唆するが、そのメカニズムは未だ十分に解明されていない。

人間による物体色知覚メカニズムに関する研究は種々あるが⁽¹⁾、MacLeodらのグループは物体表面色の知覚がシーンの単純な画像統計量(平均色度と色度輝度相関)によって変化するという重要な結果を心理物理実験により示している⁽²⁾。

そこで研究課題実施者は、MacLeodと共に、彼らの結果を説明可能な理論として、「視覚系は物体表面色が取りうる最大輝度分布と照明光の関係の物理特性(図1)を経験的に獲得して色知覚に適用しているという」仮説を立て、心理物理実験により観察シーンの各色の色度と輝度のバランスと色知覚の関係から、その仮説を間接的に支持する結果を示している⁽³⁾。

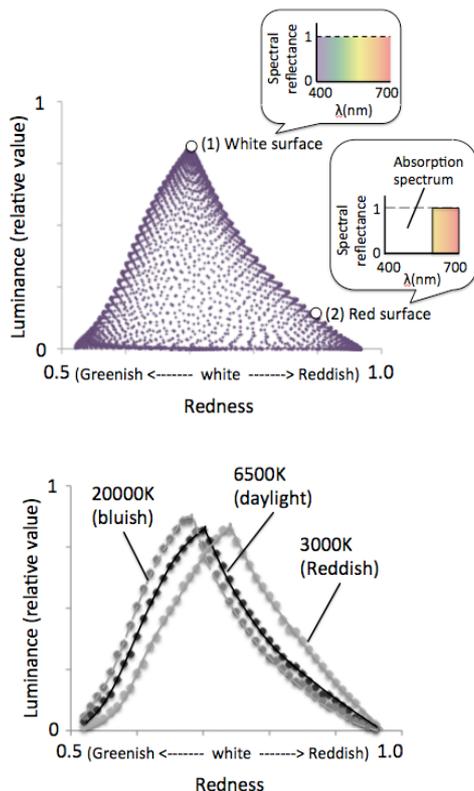


図1. (a)ある照明環境で物体表面色が取りうる色度輝度分布. 赤い表面(2)は短波長を吸収するため白色面(1)と比較して相対的に輝度が低い. (b)照明光の色温度による色度輝度分布の変化.

知覚的な物体表面色の最大輝度に関する研究には、シーン内の白色の輝度の影響⁽⁴⁾、対象となる面や周辺の色の影響⁽⁵⁾など様々な

要因が明らかにされているが、物理的または経験的な物体色の最大輝度と照明光の関係については検討されていない。

2. 研究の目的

本研究課題では前述の「視覚系は物体表面色が取りうる最大輝度分布と照明光の関係の物理特性(図1)を経験的に獲得して色知覚に適用している」という仮説に関して、より直接的な方法で検証をおこなうことを目的とした。その手段として、知覚的な物体表面色の最大輝度分布(物体表面が発光して見えないための臨界輝度)を実際に測定して、物理特性にもとづく物体色の最大輝度分布、実環境における物体色の輝度分布との比較をおこなう。

はじめに、高彩度、高明度の物体を中心に、様々な物体の分光反射特性を実際に測定することで、実環境における各色度の最大輝度分布データベースを作成する。

次に、コントロールした視覚刺激における知覚的な表面色の限界輝度分布を測定する心理物理実験をおこなう。シーンの照明光や物体表面反射率の変化を模擬した色度輝度分布をもつ視覚刺激に対して、知覚的な表面色限界輝度分布が示す性質を明らかにして、実環境における最大輝度分布と比較する。

最後に、シーンの色情報の物理量から知覚的な表面色の限界輝度分布を求める手法を提案する。また、観察対象に実環境のシーンを用いた心理物理実験を実施する。

3. 研究の方法

(1) 経験的な物体色限界輝度の測定(分光反射率データの光学測定)

経験的な物体色の限界輝度分布を作成するため、自然物400種類の分光反射率および自然物92種類の分光透過率を測定した。

葉、花、果実、樹皮、石、などを研究室の暗室内に設置した標準光源ブースに置き、トプコンテクノハウス製の分光放射輝度計を使用して分光測定をおこなった。

分光反射率の測定では、サンプル上方の標準照明ブースの光源に対するサンプルの反射光を仰角45°から測定した。その際、反射率が既知の校正済み標準白色板に対する測定結果を基準とした。

透過光の測定では、サンプルをLEDビューワーの上に置き、透過光を仰角45°から測定した。このときサンプルを置かずに測定した結果を基準とした。

得られた400種類のサンプルの分光反射率と、分光放射輝度データから、Stockman & Sharpe⁽⁶⁾の錐体応答関数を用いてMacLeod & Boynton⁽⁷⁾により定義される色空間に、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。こうして求まる色度輝度分布から、経験的な物体色の輝度分布を表した。また、Masaoka⁽⁶⁾の方法を用いてオプティマルカラーを計算して物理的な物体色限界輝度を算出した。

(2) 知覚的な物体色限界輝度の測定 (色の見えのモード移行輝度の心理物理的測定)

知覚的な物体色の限界輝度分布を求めるため、心理物理実験を実施した。実験はキャリブレーション済みの CRT ディスプレイを用いて、シーンの照明光や物体表面反射率の変化を模擬した色度輝度分布をもつカラー画像を視覚刺激として呈示した。

実験刺激は、テスト領域と周辺刺激から構成された。テスト領域は、被験者がその輝度を独立に変化させることができ、被験者はこの領域の輝度を物体表面の色と知覚する最大輝度に合わせる調整タスクを実施することで知覚的な表面色限界輝度分布を求めた。周辺刺激は、多様なシーンを模擬した色度輝度分布を与えることにより、テスト領域の表面色の限界輝度への影響を調べた。なお、刺激には単純な幾何学図形を用いて、高次の物体認識の寄与を除外し、色輝度情報のみの影響を調べた。

実験条件は 2 系列、周辺領域の色の導出時に用いた照明光の色温度 3 種類と、テスト領域の色度であった、求めた知覚的な表面色限界輝度と、物理的な拘束条件による最大輝度の相関を求めて結果を評価した。

この方法により得られた、各テスト領域の色度に対する輝度の調整結果を、知覚的な物体色の最大輝度とした。

(3) 自然画像を用いた知覚的な物体色限界輝度の心理物理学的手法による測定

物理的な物体色限界輝度 (オプティマルカラー) と経験的な物体色限界輝度 (自然界の色分布) との間には差があるという測定結果に対して、自然画像と、日常性が低く特定の意味を持たない抽象的な画像とでは、知覚的な物体色の限界輝度分布が異なる可能性を検討した。

画像の自然度による色の見えのモード移行輝度を求めるための、心理物理実験を実施した。実験はキャリブレーション済みの液晶ディスプレイを用いて、視覚刺激を呈示して、それに対する実験参加者の色の見えを測定した。

図 2 に示す、画像中に使用される色が等しい自然画像と抽象画像の二種類の画像を作成して、色度とモード移行輝度の関係を比較した。実験画像は、植物の画像から色数を削減したもの (自然画像刺激) と、その画像と各色の面積比がほぼ等しくなるように全て円形に置き換えたもの (抽象画像刺激) を使用した。色数の削減には Matlab

(MathWorks) の `rgb2ind` 関数を用いた。画像中の花の部分进行测试領域として、それ以外を周辺領域とした。

実験では、実験参加者が、ディスプレイ上に呈示された視覚刺激のテスト領域の輝度をキー操作で上下させて「色の見えのモード移行期度」に合わせる調整法によりデータを取得した。テスト領域の色度は実験条件として試行ごとに変更された。この方法により得られた、各テスト領域の色度に対する輝度の調整結果を、知覚的な物体色の最大輝度とした。



図 2. 実験刺激として作成した自然画像 (上) と抽象画像 (下)。

4. 研究成果

(1) 経験的な物体色限界輝度の測定 (分光反射率データの光学測定)

図 3 は、本研究で使用した 400 種類の分光反射率データに、Brown⁽⁹⁾の測定したデータのうち空と水を除き、その中から分光反射率の測定結果がどの波長帯でも 1 を超えていないもの計 469 種類の分光反射率データを追加した全 869 種類の自然物分光反射率に対して、黒体放射 6500K の分光放射輝度を乗じて求めた、3次元の色空間における色度輝度分布である。底面は色度を表し、横軸が赤緑方向の色変化、縦軸(奥行軸)が青黄方向の色変化を表す。高さ軸は輝度を表す。この 3次元形状を輝度軸上の正の方向から俯瞰したときの表面形状が、経験的な物体色の最大輝度分布である。

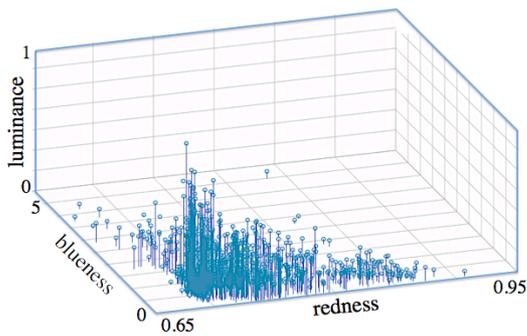


図3. 黒体放射 6500K の照明下における自然物 921 種類の色度輝度分布

(2) 知覚的な物体色限界輝度の測定 (色の見えのモード移行輝度の心理物理的測定)

図4の黒太線は、実験で得られたテスト領域の色度に対する輝度の調整結果の被験者間平均値を表す、誤差棒の付いたプロットは各被験者の結果である。つまり、これらは知覚的な物体色の最大輝度を意味する。オプティマルカラーは物理的な物体色最大輝度を表す。自然物データは経験的な物体色最大輝度を表す。

物理的な表面色限界輝度であるオプティマルカラー、本研究および Brown⁽⁹⁾の自然物表面分光反射率データに基づき計算して求めた経験的な表面色限界輝度を比較したところ、測定結果である知覚的な色の見えのモードが変化する輝度は、物理的な表面色限界輝度と類似した特性を示すことが明らかになった。

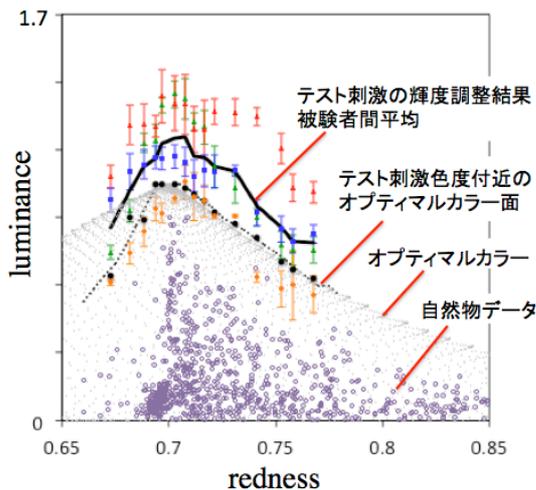


図4. 物体色の最大輝度の比較.

この結果から、人間の表面色の知覚特性は物理的な表面色限界輝度に基づいて成立しており、観察シーンにおける物理的な表面色限界輝度を周辺刺激から何らかの方法で獲得していると考えられる。一方で、使用した

抽象画像において色情報は自然物の計測データから選択したが、重なりあう多数の円という画像の構成要素は日常で観察する機会は少なく物体として解釈しづらい。草木などの自然風景を実験刺激とすることにより、知覚的な物体色の最大輝度が経験的な物体色の最大輝度に近づく可能性がある。

(3) 自然画像を用いた知覚的な物体色限界輝度の心理物理学的手法による測定

図5は、自然画像と抽象画像に対して、それぞれ実験で得られたテスト領域の色度に対する輝度の調整結果を表す、つまり二種類の異なるシーンに対して知覚的な物体色の最大輝度を比較する。

画像種類とテスト領域色度を要因とした二要因分散分析により、画像種類による主効果の有意な傾向 ($p < 0.1$)、テスト領域色度による主効果と ($p < 0.05$)、二要因の交互作用 ($p < 0.05$) が示された。多重比較検定の結果、刺激色番号4において画像種類による有意差 ($p < 0.05$)、刺激色番号1, 2において画像種類による有意傾向 ($p < 0.01$) が示された。

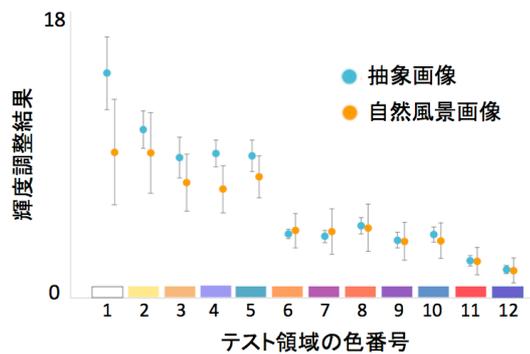


図5. 自然画像と抽象画像における知覚的な物体色最大輝度の比較図

自然風景画像と抽象画像とでは、物体色と知覚される最大輝度が異なり、抽象画像においてより大きな値を示した。これは、画像が日常的、自然物、有意味なシーンであるかという要素により、知覚的な物体色最大輝度が増加することを示唆する。

(4) 物体色知覚における照明光推定のための計算モデル改良

これまでの成果を踏まえて、物体色知覚における照明光推定モデルとして研究課題実施者らが既に発表している色恒常性オプティマルカラーモデルの改良および評価をおこなった。このモデルでは、与えられたシーンの各点における色度輝度分布を、物理的な最大輝度の色度輝度分布と比較することにより、最小二乗法をベースとした誤差計算方法を用いて、最も一致度が高い照明条件を探索する。心理物理学的手法による色の見えの実験結果および、実環境の自然光や自然物の分

光測定結果にたいして、このモデルを適用し、他の恒常性モデルとの比較をおこなった。その結果、従来モデルよりも特にシーンに存在する色の偏りに対しても堅牢な推定が可能であることが示された

6. まとめ

本研究課題においては、視覚系は物体表面色を取りうる最大輝度分布と照明光の関係の物理特性(図1)を経験的に獲得して色知覚に適用している」という仮説に対して、物理的・経験的・知覚的な物体色最大輝度を比較する方法により検証をこころみた。その結果、知覚的な物体色最大輝度は、物理的な最大輝度であるオプティマルカラーに類似することが示された。一方で、シーンの構成要素が花や葉などの自然物である場合は、抽象的なシーンよりも知覚的な最大輝度が低くなる結果が表れた。また、これらの成果を用いて、物体色知覚における照明光推定のための計算モデルを改良し、特にシーンの色の偏りに対して他の計算モデルよりも安定した推定結果が得られた。

<引用文献>

1. Foster, Color constancy, *Vision Res* (2011) vol. 51 (7) pp. 674-700
 2. Golz, J. & MacLeod, D. I. A. (2002). Influence of scene statistics on colour constancy. *Nature*, 415, pp. 637-640.
 3. 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).
 4. F. Bonato and A. L. Gilchrist, "The perception of luminosity on different backgrounds and in different illuminations," *Perception* 23, 991-1006 (1994).
 5. J. M. Speigle and D. H. Brainard, "Luminosity thresholds: effects of test chromaticity and ambient illumination," *J. Opt. Soc. Am. A* 13, 436-451 (1996).
 6. Stockman and Sharpe. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Res* (2000) vol. 40 (13) pp. 1711-37
 7. MacLeod and Boynton. Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *J Opt Soc Am* (1979) vol. 69 (8) pp. 1183-6
 8. K. Masaoka, "Fast and accurate model for optimal color computation," *Opt. Lett.* 35, 2031-2033 (2010).
 9. R. Brown, "Background and illuminants: the yin and yang of colour constancy," in *Colour Perception: Mind and the Physical World*, R. Mausfeld and D. Heyer, eds. (Oxford University, 2003), pp. 247-272.
- ## 5. 主な発表論文等
- [雑誌論文] (計1件)
1. T. Morimoto, K. Fukuda, K. Uchikawa, Effects of surrounding stimulus properties on color constancy based on luminance balance, *Journal of the Optical Society of America A, Optics and image science*, Vol. 33, No. 3, pp. A214-A227
DOI: 10.1364/JOSAA.33.00A214
- [学会発表] (計7件)
1. K. Uchikawa, K. Fukuda, Illuminant estimation by the optimal color hypothesis for natural objects and daylights, The 24th Symposium of the International Colour Vision Society (ICVS 2017), Erlangen, Germany, 2017 Aug. 18-22
 2. 福田一帆, 内川恵二, 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, 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 2017年6月2日(東京大学 弥生講堂 アネックス セイホクギャラリー)
 3. T. Morimoto, K. Fukuda, K. Uchikawa, Luminance-balance based estimation of an illuminant in chromatically biased scenes, OSA Fall Vision Meeting 2015, San Jose, California, USA, 2015, Oct. 16-18
 4. T. Morimoto, K. Fukuda, K. Uchikawa, Influence of the number of surrounding colors on luminance-balance based estimation of illuminant, The 23rd Symposium of the International Colour Vision Society (ICVS 2015), Tohoku University, Japan, 2015, July 3-7
 5. T. Kusuyama, K. Fukuda, K. Uchikawa, Illuminant estimation using the optimal-color hypothesis on color constancy, The 23rd Symposium of the International Colour Vision Society (ICVS 2015), Tohoku University, Japan, 2015, July 3-7
 6. 張 聡, 福田一帆, 三橋俊文, 内川恵二, 自然物表面の色度・輝度分布特性, 日本視覚学会 2015年冬季大会, 工学院大学新宿キャンパス, 2015年1月21-23日
 7. C. Zhang, T. Matsumoto, K. Fukuda, T. Mihashi, K. Uchikawa, Measurements of daylight during a day and at various locations, The 10th Asia-Pacific Conference on Vision 2014, July 19-22
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
福田 一帆 (FUKUDA Kazuho)
工学院大学・情報学部・准教授
研究者番号: 50572905