

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23730696
 研究課題名（和文） 三次元空間における物体表面の色知覚メカニズムの解明
 研究課題名（英文） Investigation of object color perception in three dimensional scene

 研究代表者
 福田 一帆 (Fukuda Kazuho)
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教
 研究者番号：50572905

研究成果の概要（和文）：

物体色の知覚は反射光の色度から物理的に求まるのではなく、視覚系により照明光の影響が差し引かれて知覚される。本研究では、観察シーンの三次元情報が物体表面の色知覚に与える影響を検討し、更に観察シーンに分布する色情報から視覚系により差し引かれる照明光色度の推定モデル作成をおこなった。心理物理実験の結果、両眼性の奥行き情報の効果および色空間における色度輝度分布外形の重要性が示された。また、実験結果を適用することで、照明光推定モデルのパフォーマンスが向上した。

研究成果の概要（英文）：

Object colors are not perceived directly from physical chromaticity of the reflected light. Visual system involuntarily subtracts illuminant color from the light reflected from the surface. This study investigated the effect of 3D depth cue on object color perception and constructed a model estimating the subtracted illuminant color based on the luminance-chromaticity information in a scene. Our psychophysical experiments showed significant effects of binocular depth cue and the importance of luminance-chromaticity distribution envelope in a color space. Adopting our results also improved the performance of model estimating the subtracted illuminant color.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：感覚・知覚・色覚，色恒常性，照明光推定

1. 研究開始当初の背景

人間による物体表面の色知覚は物体自体の反射光の物理量のみからは推定できない。例えば、青色照明環境下の白色物体と、白色照明環境下の青色物体は、反射光は等しくて

も異なる色に知覚される。これは人間が照明光を推定・分離して物体色を知覚することを示すが、そのメカニズムは未だ明らかでない。近年、映像表示技術が進み、高精細な三次元立体映像表示が可能になっているが、リアリティ向上には人間の表面色知覚特性の解明

が不可欠である。

人間の照明光推定・物体色知覚メカニズムについては、Golz & MacLeod がシーンの画像統計量（平均色度と色度輝度相関）と人間の物体表面色の知覚との間に高い相関があることを心理物理実験により示している（Golz & MacLeod, "Influence of scene statistics on colour constancy", *Nature*, 415, pp.637-640, 2002). しかし、上記含め多くの研究では二次元画像・一様照明のみを対象としており、使用する物理統計量も画像全体の平均値である。

一方、三次元空間における物体表面色知覚に関する研究においては、例えば Yang & Shevell の両眼視差付加による奥行き情報が表面色知覚のための照明光推定を向上させることを示した研究（Yang & Shevell, "Stereo disparity improves color constancy", *Vision Research*, 42, pp.1979-1989, 2002）は、三次元的な情報が照明光推定に重要な役割を果たしていることを示唆する。しかし、照明は一様であり、照明の空間分布などについては言及されていない。

2. 研究の目的

本研究では、観察シーンに三次元的に分布する色情報が、そのシーンに存在する物体表面の色知覚にどのような効果を持つかを明らかにすること、そして、観察シーンの色と輝度の情報からそのシーンにおける色知覚を推定するモデルの構築をおこなうことを目的とした。

これらの目的達成のため、次の3つの課題を設定して研究を遂行する。

- 1) 照明光の色みが空間的に変化する観察シーンにおいて、そのシーンの二次元的な情報と三次元的な情報が物体の色の見えに与える影響を明らかにする。
- 2) 観察シーンに照明光とは独立の光源が含まれるような照明の影響が均一でない環境における物体の色の見えについて検討する。
- 3) 観察シーンに分布する色情報と物体表面の色知覚の関係を表し、その結果から色恒常性メカニズムにおいて差し引かれる照明光の色度を推定する計算モデルを構築する。

3. 研究の方法

研究目的達成のために設定した前述の3つの課題それぞれについて、以下の方法による心理物理実験を遂行した。

(1) 観察シーンの三次元情報による物体表面色知覚への効果

実験1として、観察シーンの三次元的な情報の違いが、観察者による物体の色知覚に与える影響について明らかにするため、幾何学物体を配置した三次元の観察シーンを実際に作成し、異なる実験条件によるテスト物体の色の見えの変化から、被験者の色覚メカニズムが推定した照明光の色情報を求める実験をおこなった。

観察シーンは、図1に示すように、幾何学物体を配置して作成した。図2には観察者側から見た観察シーンを示す。各物体にはそれぞれ異なる色のつや消し塗装を施してある。中央の楕円形に見える物体がテスト物体である。テスト物体は白色の正円であり、水平面から32°傾いている。この観察シーン全体は被験者の頭上に設置したプロジェクタの光によって照明されている。投影方向は仰角58°であり、テスト物体の面と垂直である。また照明の色は実験条件により異なる。

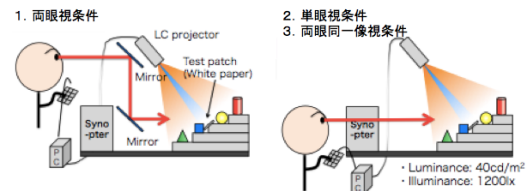


図1. 各観察条件の実験概略図

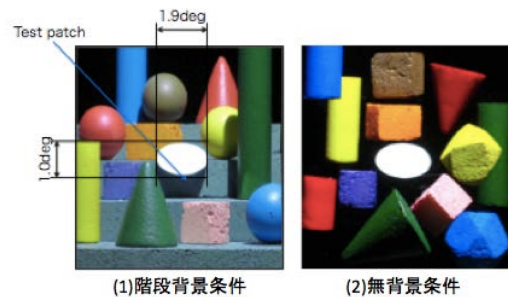


図2. 観察者から見た観察シーンの例

シーンの三次元情報をコントロールするための実験条件として、3種類の観察条件（両眼視、単眼視、両眼同一像視）、2種類の背景条件（階段背景、無背景）、2種類の照明条件（一様照明、色勾配照明）に関して、実験をおこなった。観察条件と背景条件は、それぞれ両眼性と単眼性の三次元奥行き情報をコントロールするための条件である。背景条件に関しては、階段背景のシーンからは単眼視でも奥行き情報が十分に得られるが、無背景のシーンからは単眼視では奥行き情報は得られない。また、照明条件に関して、一様照明条件では、シーン全体に一様な色度

の光を照射した。色勾配照明条件では、シーンの奥行き方向に照明光の色度を連続的に変化させた。観察条件に関して、両眼同一像視条件は、左右両眼に同一視点からのシーンが観察されるように設計されたビームスプリッタとミラーから成る光学系（シノプター）を通して観察することで実現した。また、単眼視条件においても、片眼を眼帯で覆った状態で同じ光学系を通して観察をおこなった。この光学系内部の光路に起因する観察条件間の観察距離の違いを排除するため、両眼観察条件では図1に示すように2枚のミラーを利用した。

被験者は実験の各試行において、テスト物体が観察シーンの照明環境下における白色の紙に見えるように、テスト物体部分に投影されるプロジェクタからの光の色度をテンキー操作により調整するというタスク（無彩色マッチング）が課せられた。その際、テスト物体以外に投影される光は変化しない。この手続きによって、求められた色度の調整結果は、被験者の色覚メカニズムが推定した照明光の色を表す。

(2) 観察シーン内に存在する独立光源による周辺の物体表面色知覚への影響

実験2として、観察シーンに照明光とは独立の光源が含まれるような照明が一様でない環境における物体の色の見えについて検討するため、シーンに含まれる各色の輝度を変化させて高輝度色光による色恒常性への影響を調べた。

観察シーンとなる実験刺激は、61の六角形からなる多色の幾何学パターンとすることにより、観察シーンに対する認知的な情報の影響を除いた。実験刺激中央の六角形がテスト刺激であり、その周辺には6色（明暗の赤青緑）の六角形が各10個分布している。被験者には前述の実験1と同様に、テスト刺激の見えが白い紙に見えるようにテスト刺激の色度を調整する無彩色マッチングのタスクが課せられ、色度の調整結果から被験者の色覚メカニズムが推定した照明光の色を求める。

実験条件として、周辺刺激6色中の1色、高輝度の青または赤の六角形10個の輝度を標準条件から最大3段階増大させて、赤/青の輝度比の異なる7種類の刺激を作成した。輝度の倍率は、事前観察において色の見えが物体表面としての見えから、光源としての見えへ変化する輝度範囲であることを確認して決定している。

異なる色の刺激の輝度比は色恒常性に影響し、例えば青い色光の輝度が高いほど、シーンの照明光推定結果は青にシフトすることが知られている（Uchikawa, Fukuda, Kitazawa & MacLeod, "Estimating

illuminant color based on luminance balance of surfaces", *Journal of the Optical Society of America A*, 29 (2) pp. 133-143, 2012). もし、シーンの照明光とは独立の光源と知覚される色が色恒常性に寄与しないのであれば、青い色光の輝度が増大して光源と知覚される輝度に達すると、色恒常性メカニズムに対して無効となり、照明光推定結果は、反対の色度方向つまり赤または緑の方向にシフトすることが予想される。

(3) 観察シーンの色情報による物体表面色知覚推定モデルの構築

実験3として、観察シーンにおける周辺の色度輝度情報の空間分布が物体表面の色知覚に与える効果、および周辺刺激が色知覚に与える効果の大きさの寄与の色度による違いを明らかにするための実験をおこなった。更に、色恒常性メカニズムにおいて差し引かれる照明光の色度を推定する計算モデルを提案し、実験結果と実験条件を用いて提案モデルと既存モデルの比較をおこなった。

実験では、実験2と同様の幾何学パターンを用いて、被験者は刺激中央のテスト領域について無彩色マッチングの課題を与えることで、実験結果から被験者の色覚メカニズムが推定した照明光の色を求めた。

色度輝度情報の空間分布の効果を見るための実験条件としては、色度輝度変化条件（標準条件）と、色面積比変化条件（テスト条件）の比較をおこなった。色度輝度変化条件では照明光の色度変化を模擬した色度輝度を周辺刺激のすべての色に与えた。一方、テスト条件となる色面積比変化条件では、周辺刺激の各色の色度輝度は一定であるが、各色の面積比を変化させることで、錐体応答を基準とした刺激全体の色の変化量を標準条件と等しくした。

周辺刺激の色度による色知覚に与える効果の違いを見るための実験条件としては、実験刺激の中に追加の1色を与え、その追加色の色度を、高彩度の青(-5) → 低彩度の青(-1) → 低彩度の赤(+1) → 高彩度の赤(+5)と彩度に変化する方向に10段階変化させた。このとき、低彩度における色度変化と、高彩度における色度変化の色恒常性への効果の大きさを比較した。

4. 研究成果

(1) 観察シーンの三次元情報による物体表面色知覚への効果

図3は、実験1の各条件におけるテスト物体の色度調整結果を色恒常性指数で表したものである。数値は、各条件において基準条件に対する照明光色度変化量を1としたと

きの、被験者の色度調整結果の変化量（すなわち、色覚メカニズムが推定した照明光の色度変化量の理論値に対する比率）を表す。つまり、値が1に近いほど色覚メカニズムが照明の色度変化を正しく推定したことを示す。

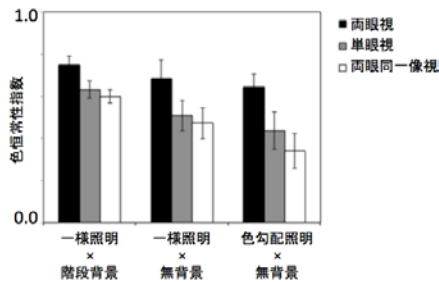


図3. 実験1各条件における色恒常性指数

実験結果から、背景条件と照明条件に依らず両眼条件では他2種類の観察条件よりも色の恒常性の成立度合いが高いことが示された。これは、両眼視条件のみに存在する両眼視差による奥行き情報の違いが物体表面の色知覚に影響していることを表す。一方、背景条件と照明条件の組合せと、観察条件に関して統計的に有意な交互作用はみられなかった。これは、無背景条件、無背景×色勾配照明条件によって三次元空間認識のための情報が両眼性手がかりに限定されても、両眼視条件の優位性が向上するとは言いえないことを示す。ただし、本実験で使用した観察シーンの照明条件は、一様照明と線形の色勾配照明のみであり、より複雑な色変化をとともなう照明環境においては異なる結果となる可能性もある。

(2) 観察シーン内に存在する独立光源による周辺の物体表面色知覚への影響

図4は被験者1名によるテスト刺激の色度調整結果から求めた色恒常性指数を更に正規化した値を縦軸に、周辺刺激の赤/青輝度比を横軸に表したものである。縦軸の数値は大きいほど色度調整結果が青方向に、小さいほど赤方向にシフトしたことを示す。また、図中の矢印は、刺激の輝度増大により色光の見えが表面色から光源へと変化した輝度比を表す。

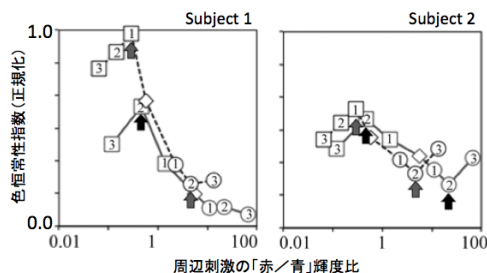


図4. 実験2各条件の色恒常性指数

結果には、明らかに色度調整結果のシフトの反転が見られる。色光の見えが光源へと変化した輝度比において色度調整結果のシフト反転が起きていることから、被験者が独立の光源であると認識するような高輝度色光による色恒常性への寄与は極めて小さいことを示す。これは照明光推定メカニズムが、独立の光源や光沢などの色光を排除し、照明光の影響が同様な物体表面による色光のみの情報を選択的に処理することを示唆する。

(3) 観察シーンの色情報による物体表面色知覚推定モデルの構築

図5は、実験1の結果と同様に、各条件におけるテスト刺激の色度調整結果を色恒常性指数で表したものである。

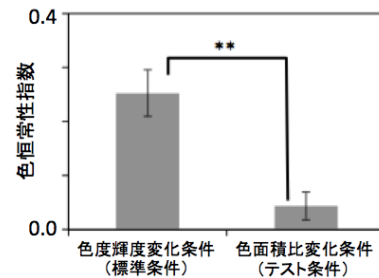


図5. 実験3における色恒常性指数

実験結果から、色面積比変化条件では、色度輝度変化条件よりも統計的に有意に指数が小さく、色恒常性に関してほぼ効果を持たないことが示された。また、色の面積比を変化させる空間位置をテスト刺激の隣接領域に集中的に配置した追加実験においても、指数は色度輝度変化条件よりも小さいことが示された。

次に、低彩度における色度変化と、高彩度における色度変化の色恒常性への効果の大きさを比較した実験結果を述べる。図6はテスト刺激の色度調整結果を縦軸に指数で表し、追加色の彩度変化を横軸に表した。横軸は負の値が青、正の値が赤を表し、数値が大きいほど彩度が高いことを示す。

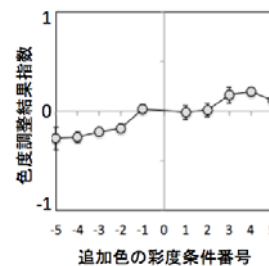


図6. 追加色の彩度と色度調整結果の関係

実験結果から、低彩度の-1 から+2 の範囲では、追加色の色度が変化したにもかかわらず、色度調整結果にはほぼ変化が見られないことが示された。つまり、色度調整結果に影響するためには、一定以上の彩度が必要であることがわかる。

以上の結果から、シーンに含まれる色度輝度情報の中において、特に色空間における色度輝度分布の輪郭を構成する色光の色恒常性メカニズムへの寄与が大きいことが明らかとなった。そこで、シーンの色輝度情報から色空間における色度輝度分布の輪郭を構成する色光のみを抽出して、さらに同一色度の重複を省いたのちに Golz & MacLeod (2002) の色恒常性モデルに適用をおこなった。

図7は、それぞれ本研究の成果の適用前と適用後のモデルを用いて、本研究で測定した色度調整結果を縦軸に、モデルに実験条件の色度輝度値を代入して求めた推定値を横軸に、プロットした結果を示す。適用後のモデルでは適用前のモデルよりも、相関値が上昇しており、Golz & MacLeod のモデルを上回る色知覚の再現性が得られることが示された。今後は、自然風景を観察シーンとした場合、より複雑な照明変化のある場合、などにおいても同様の結果が得られるか検討が必要である。

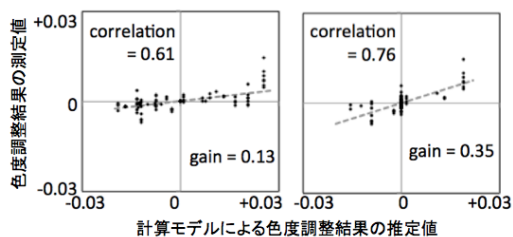


図7. 本研究の成果適用前(左)と適用後(右)の色度調整結果の推定値(横軸)と実測値(縦軸)の比較

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計7件)

- 1) K. Fukuda and K. Uchikawa, The shape of luminance-chromaticity distribution influences estimated illuminant color on color constancy, *The 22nd symposium of the International Colour Vision Society (ICVS 2013)*, July 15, 2013, University of Winchester, United Kingdom, 査読有り,

- 2) K. Fukuda, Estimating illuminant color based on the optimal color distribution, *International Symposium Color and Physiological Optics*, March 1, 2013, Tokyo Institute of Technology, Japan
- 3) K. Fukuda, K. Uchikawa and D.I.A. MacLeod, Influence of bright surrounding colors appearing in the illuminant-mode on color constancy, *Vision Sciences Society 12th Annual Meeting (VSS 2012)*, May 14, 2012, Waldorf Astoria Naples, USA, 査読有り
- 4) 福田一帆, 内川 恵二, Donald I.A. MacLeod, 周辺刺激の色の見えのモードによる色恒常性への効果, 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, March 6, 2012, 東京農工大学
- 5) K. Fukuda, K. Uchikawa, and D.I.A. MacLeod, The Luminance Balance and Color Appearance Mode of Surrounding Colors Affect Color Constancy, *OSA Fall Vision Meeting 2011*, September 16, 2011, University of Washington, USA, 査読有り
- 6) K. Fukuda, K. Uchikawa, Donald I.A. MacLeod, Influence of surrounding colors in the illuminant-color mode on color constancy, *The Asia-Pacific Conference on Vision 2011 (APCV 2011)*, July 17, 2011, Hong Kong University, 査読有り
- 7) K. Fukuda, T. Fukase and K. Uchikawa, Effects of binocular disparity on color constancy in real 3D scenes revealed with a synopter, *Vision Sciences Society 11th Annual Meeting (VSS 2011)*, May 7, 2011, Waldorf Astoria Naples, USA, 査読有り

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 一帆 (Fukuda Kazuho)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号: 50572905