

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00372

研究課題名(和文) 質感画像特徴と色認知 - 光沢色と照明色の関係に着目して -

研究課題名(英文) Relationship between material image features and color recognition: effect of specular highlight color

研究代表者

永井 岳大 (Nagai, Takehiro)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40549036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：光沢ハイライトは照明色そのものを反映する場合が多く、色恒常性の手がかりの候補の一つである。そこで本研究では、その光沢ハイライトと色知覚の関連性を明らかにすることを目的とした。はじめに、物体上の光沢ハイライトの色変化は、必ずしも照明色変化だと認知されないことを明らかにした。一方、光沢物体が多く含むシーンでは、マット物体のみを含むシーンよりも色恒常性が強く、さらにその光沢物体の優位性は、低次画像特徴が光沢物体と同一なノイズ画像上では消失することを明らかにした。これらの結果は、無意識のうちに光沢の色情報を使うことで照明色の影響を取り除いた色の見えを生起させる仕組みが脳内にあることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Specular highlights on typical objects reflect illumination colors directly, and thus is a potential cue for color constancy. In this study, we aim to elucidate the relationship between specular highlights and color perception using psychophysical experiments. First, we found no evidence that temporal color changes of specular highlights are recognized as illumination color changes. However, secondly, we showed that color constancy is stronger in scenes containing many glossy objects with specular highlights than in scenes containing only matte objects. Also, this superiority of glossy objects over matte objects disappeared in noise images whose low-level image statistics were the same as glossy objects. These results suggest that there is a mechanism in the human brain that adjusts color appearance according to specular highlight color so that the influences of illumination colors are removed from color appearance.

研究分野：視覚心理物理学

キーワード：色覚 質感 心理物理学

1. 研究開始当初の背景

PCディスプレイやデジタルサイネージ等の視覚情報呈示デバイスにおいて、色は極めて有効な画像表現の一つである。しかし、人間が認知する色は、眼へ入射した光の波長成分そのものではなく、他の様々な要因の影響を受けて変化する。例えば、人間は物体の色をなるべく正確に知るために、物体上の反射光から照明色の影響を除去する脳内画像処理後の色を知覚・認知する。これは色恒常性と呼ばれる現象で、自然場面中の色認知に大きく影響する。色恒常性は照明色によらず物体色を適切に認知する優れた機能だが、逆の見方をすれば認知色を歪ませているとも言え、その歪みの正確な把握が視覚情報呈示における正確な認知色再現に極めて重要である(例:カメラのホワイトバランス)。色恒常性は一般に視覚情報に基づく脳による照明色推定という枠組みで捉えられており、本研究ではこの照明色推定の脳内処理に着目する。

物体上に同じ色光を生じる照明色と物体色の組合せ候補は無数に存在するため、照明色推定は一意解が求まらない不良設定問題である。脳は自然画像の特性を糸口とし、この問題を平均色や画像統計量の算出など比較的単純な処理によりある程度解決することが、長年の研究から知られている(Foster, 2011)。しかし、特に自然画像などの複雑な視環境において、平均色などの単純な情報だけでは安定した照明色推定には不十分で、照明色推定に対し、より複雑だがロバストな画像手がかりが存在することが疑われる。



図1 光沢ハイライト

ところで近年、従来の二次元的な色・輝度などの単純な画像情報ではなく、光沢感や素材感といった高次質感情報を捉える視覚認知能力が注目されている。例えば、様々な素材の物体を観察している間のfMRI計測などにより、質感認知に特化した情報処理機構が脳内に存在する可能性が示されつつある(Hiramatsu et al., 2011)。ここで、質感と呼べる画像特徴の中で光沢ハイライトに着目する。金属などを除く多くの光沢物体において、光沢ハイライトは照明色をほぼそのまま反射する特性を有する(以下、光沢ハイライトの色を「光沢色」と呼ぶ)。平均色算出などと比較して画像からの光沢色抽出は複

雑な処理が必要だと思われるが、脳がその処理を瞬時に達成でき、かつ上述した光沢色の特性を知っているのであれば、光沢色は照明色推定という不良設定問題に対する極めてロバストで直接的な画像手がかりの候補となりうる。照明光推定に対する光沢色の効果(以下、仮に「光沢色効果」と呼ぶ)はごく少数の研究で検討されてはいるが(例: Granzier et al., 2014)、その効果の有無は研究により大きく異なり、結論が出ていない。当然、その光沢色効果の強さは全く分かっていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は主に二つである。第一の目的は、光沢色が照明色推定に寄与するために必要な実験変数(画像条件、実験課題等)の抽出およびその影響の大きさを定量化することである。従来研究では実験変数が全く統制されておらず、また光沢色効果の有無しか検討されていなかった。そこで、それら実験変数の影響を横断的に調べることで、光沢色効果の存在を確実に示し、かつ実験変数の影響を考慮した上で光沢色効果の強さの定量的把握を目指す。

第二の目的は、光沢色が持つ画像特徴のうち、視覚系がどのような特徴を活用するかを解明することである。例えば、光沢を有する物体と有しない物体では、その画像から知覚される質感が異なるだけではなく、そもそも輝度コントラストや最高輝度等の単純な画像特徴からして大きく異なる。これらの違いのうち、何が光沢色効果に寄与しているのかを明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

以下の3項目を順に実施した。

■項目1 光沢色効果の存在の確認

従来知見では、光沢色効果が見られる実験結果と見られない実験結果があり、その効果の存在自体が明確に示されたとは言えない状況であった。すなわち、本研究で実験変数などの影響を定量化する前の準備段階として、光沢色効果の存在を確実に示す必要がある。そこで、異なる従来研究で採用された実験条件をそれぞれ可能な限り再現しながら追試実験を横断的に行い、光沢色が照明色推定に何らかの効果を持つ実験条件が存在することを明確に示す。なお、光沢ハイライトの輝度は非常に高いため、単に高輝度領域が照明光推定に寄与(例: Uchikawa et al., 2012)したアーティファクトの可能性を排除するコントロール条件を設定するなど、慎重・緻密に実験条件を設定する。

■項目2 実験変数の影響の定量化

人間の色知覚の予測において、実験変数の影響の定量化は極めて重要なため、本項目ではこれを目指す。具体的な実験変数として、

1. 実験課題(色の見え判断、物体色判断、照明色変化・物体色変化の識別)、2. 光沢の強

さ、3. 照明色 に着目し、A. 細かなステップで単独変数値を操作することでその影響を定量化する、B. 複数の実験変数を同時に変化させることにより複数実験変数間の相互作用の検出および定量化を行う、という2つの方針で実験を行う。

■項目3 高次質感認知と照明光推定の関係性の解明（目的2に対応）

本項目では、脳が自然界の複雑な画像特徴をどこまで活用するか、という問題に迫るべく、高次質感認知と色恒常性の関係性の解明を目指す。光沢ハイライトを付与すると、知覚的な光沢感が変化する一方で、輝度コントラストなどの単純な輝度統計量（低次画像特徴）も合わせて変化する。光沢感を知覚するためには、ハイライトと陰影パターンの空間位置整合性などの解析が必要になる（Kim et al., 2011）が、視覚系が光沢ハイライトに関する画像処理をどこまで行って色恒常性に活用しているのかは重要な疑問点の一つである。そこで、低次画像特徴を維持したまま物体画像の光沢感のみを低下させる画像処理を施したシーンに置いて色恒常性の強さを定量化することにより、光沢色効果に関わる情報処理レベルの推定を目指す。

4. 研究成果

はじめに、実施した実験課題の中で、照明色変化・物体色変化識別課題のみ全く異なる傾向の結果が得られたため、ここで取り上げる。この課題では、単一物体の刺激のみが呈示され、その色度が時間的に変化した。被験者は、その色度変化が物体色変化により引き起こされたように知覚されたのか、照明色変化により引き起こされたように知覚されたのかを二肢強制選択法により応答した。実験条件は、物体にハイライトが存在する光沢条件とハイライトが存在しないマット条件の2条件であった。

その結果、色度変化量が小さいほど照明変化と知覚されやすい傾向があり、被験者は色情報に基づいた応答が可能であったことが示唆された一方で、光沢条件とハイライト条件間にはほとんど応答特性に違いがなかった。この実験課題では、被験者には認知的な照明色を判断してもらう必要があった。このことを考慮すると、これらの結果は光沢ハイライトが照明色の「認知」にはほとんど影響を及ぼさない可能性を示している。同様な傾向は、他の研究者らによる近年の実験結果からも報告されている（Lee & Smithson, 2016, 2017）。

一方、他の課題では全く異なる傾向が得られた。他の課題、色の見え判断課題と物体色判断課題では、多数の物体が配置された空間内とそこに置かれたテスト物体からなる画像を刺激として用いた。刺激の例を図2に示す。この刺激内の中央にあるテスト物体の色度を被験者がトラックボールにより調整

きた。その調整の判断基準は、「色の見えとして灰色になるようにする（色の見え判断）」と「灰色の物体がシーンにあるときに想定される色にする（物体色判断）」の2種類であった。この課題を様々な照明光色（A, D65, 25000K）のシーンをシミュレートして実施し、被験者の調整色度を照明光色間で比較することにより、被験者がどれだけ照明色の影響をキャンセルできたか、すなわち色恒常性の強さを計測した。

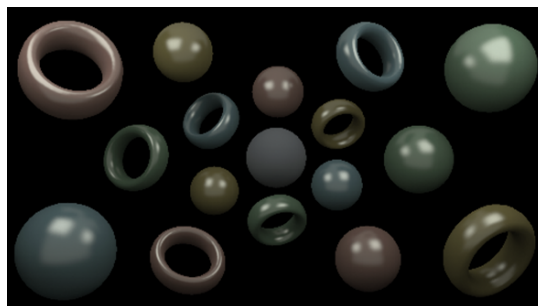


図2 実験刺激の例。中央の物体がテスト物体。周辺刺激として呈示される物体の光沢の強さが様々に変化する。

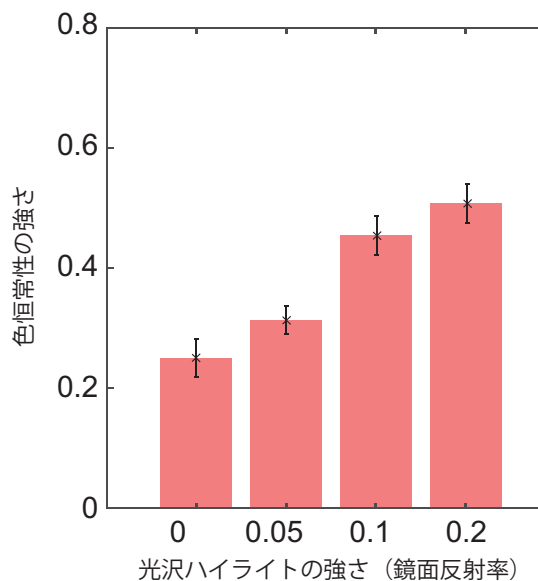


図3 計測された色恒常性の強さの一例。

恒常性の強さの結果の一例を図3に示す。この結果は、様々な鏡面反射率を持つ物体が存在するシーンでA光源下において色の見え判断課題により計測された色恒常性の強さを示す。グラフから明らかなように、鏡面反射率が高くなる、すなわち知覚される光沢感が強くなるほど色恒常性が強くなることが明らかとなった。この結果は、たとえ周辺にある物体一つ一つからは照明色の認知が可能でなくとも、光沢ハイライトに含まれる何らかの画像特徴を色恒常性の手がかりとしてヒト視覚系が用いていることを示唆している。

この光沢色効果は、物体色判断課題でも得られたものの、その大きさは色の見え判断課題において大きかった。これら色の見え課題と物体色判断課題を比較すると、物体色判断課題においてより強い認知的判断が要求されることから、やはり光沢色効果は照明色の認知に作用した結果として現れるのではなく、無意識のうちに色の見えを調整する仕組みであると考えられる。この照明色認知と色恒常性の分離はいくつかの研究からも指摘されている (Granzier et al., 2009)。さらに、光沢色効果は、図3に示すようにA光源下では非常に強く頑健であった一方で、25000K光源下では微弱であった。マット物体のみが存在する状況下ではA光源下よりも25000K光源下の方が色恒常性がそもそも強かった (Weiss, Witzel, & Gegenfurtner, 2017 などと同様) ため、光沢色効果は、色恒常性が弱い状況下で追加的に機能するのかもしれない。

ところで、光沢色効果に寄与する光沢ハイライト中の画像成分とは何であろうか。鏡面反射率が増加して光沢ハイライト成分が強くなると、もちろん知覚的な光沢感も強くなる一方で、輝度コントラストや最大輝度、輝度空間周波数成分といった低次画像特徴も大きく変化することになる。これらのうち、光沢色効果の要因が何なのかは、過去に全く検討されていない。

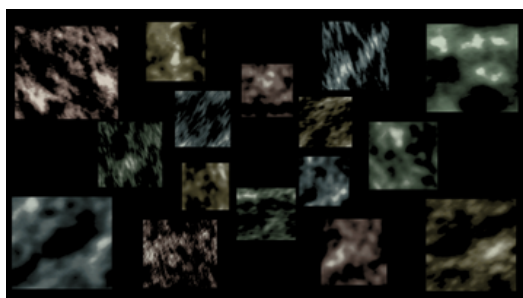


図4 ノイズ周辺刺激。

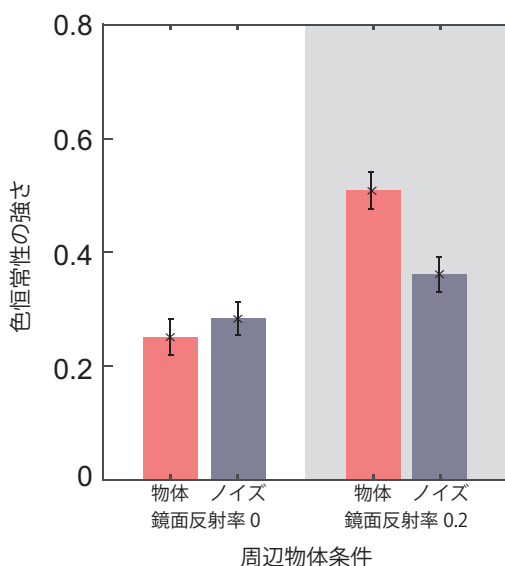


図5 追加実験の結果。

そこで、知覚的光沢感の影響と低次画像特徴の影響を切り分けることを目的として、追加実験を行った。その実験では、光沢物体とほぼ同一な低次画像特徴を持つが光沢感・物体感が大きく損なわれる画像を周辺刺激として用い、色恒常性を計測した。追加実験で用いた刺激の例を図4に示す。これらの周辺刺激は、図2に示した各周辺物体の空間周波数振幅を維持したまま位相成分のみをランダム化し、さらに図2の各物体の輝度・色度とのヒストグラムマッピングを行うことで作成された。したがって、図2と図4の各周辺物体部分においては、空間周波数成分がほぼ同一であり、また輝度・色度ヒストグラムについては完全に同一であった。

追加実験の結果を図5に示す。この図の物体条件の結果は図3からの再掲であり、ノイズ条件のみが追加実験の結果である。はじめに鏡面反射率0、すなわちマット物体が周辺刺激であったときの結果を見る。この条件では、物体条件でもノイズ条件でも色恒常性の強さにほとんど影響がなく、統計的にも有意な差は確認されなかった。マット物体に基づく色恒常性では、物体らしさはほとんど色恒常性に寄与せず、低次画像特徴が色恒常性の手がかりとして重要であると考えられる。

一方、鏡面反射率0.2の結果を見る。この場合には、物体条件と比較してノイズ条件で色恒常性の強さが大幅に低下していることがわかる。この色恒常性の強さの違いは統計的にも有意であった。しかしながら、マット物体の結果と比較すれば、たとえノイズ刺激であっても鏡面反射率0.2の場合の方が有意に色恒常性が大きかった。これらの結果は、色恒常性に対する光沢感効果には、低次画像特徴による寄与もあるものの、それ以上に知覚的光沢感に強く関わるより高次の画像特徴の影響もかなり大きいことが明らかとなった。

上述した一連の結果から、光沢ハイライトが色恒常性に寄与する条件が確かに存在すること、また、その光沢色効果は光沢画像が持つ低次画像特徴だけでは説明できないことが明らかとなった。今後の研究では、光沢色効果と他の色恒常性手がかりとの相互作用が重要な論点となると思われる。特に、本研究課題の実験結果においても、25,000K光源下では光沢色効果がほとんど見られなかったことから、光沢ハイライトによる色恒常性の寄与はあくまで他の手がかりに対して追加的要素に過ぎない可能性もある。今後は様々な手がかりの足し合わせモデルによる色恒常性の強さの回帰分析などを通して、様々な質感を有する画像から色恒常性の強さを予測できるようになることが、科学・応用の両側面から重要になっていくであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. 清川宏暁, 川島祐貴, 山内泰樹, 永井岳大: 能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習. 日本感性工学会論文誌, 17(2), 309-319, 2018. (査読あり) DOI: 10.5057/jjske.TJSKE-D-18-00019)
2. T. Nagai, S. Kaneko, Y. Kawashima, & Y. Yamauchi: Do specular highlights and the daylight locus act as cues for estimating illumination color from a single object? *Optical Review*, 24(1), 47-61, 2017. (査読あり) DOI: 10.1007/s10043-016-0295-6

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 石川智和, 田代知範, 山内泰樹, 永井岳大: 色恒常性に対する光沢感と低次画像統計量の影響の比較. 日本視覚学会 2018 年冬季大会, 2018.
2. 道上隼人, 川島祐貴, 山内泰樹, 永井岳大: 光沢ハイライトによる色恒常性への寄与は低次画像特徴に起因するのか? 日本視覚学会 2017 年冬季大会, 2017.
3. T. Nagai, R. Suto, Y. Machida, Y. Kawashima, & Y. Yamauchi: Effects of specular highlight on color constancy: appearance setting vs paper setting. *Vision Sciences Society 2016 Annual Meeting*, 2016.
4. 町田陽介, 川島祐貴, 山内泰樹, 永井岳大: 色恒常性における光沢ハイライトの効果 -実験タスクの影響-. 日本視覚学会 2016 年冬季大会, 2016.
5. 永井岳大, 須藤涼汰, 川島祐貴, 山内泰樹: 光沢ハイライト色による色恒常性への寄与. 日本色彩学会第 46 回全国大会 [米沢]15, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

永井 岳大 (NAGAI, Takehiro)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 40549036