

〈一般研究課題〉 明るさ感と輝き知覚を誘導する画像手がかりの
神経生理学的研究

助成研究者 豊橋技術科学大学 鯉田 孝和



明るさ感と輝き知覚を誘導する画像手がかりの 神経生理学的研究

鯉田 孝和

(豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所)

Image cues for brightness and self-luminous perception, a neurophysiological study

Kowa KOIDA

(Electronics-Inspired Research Institute, Toyohashi University of Technology)

Abstract :

Color is a crucial factor for designing the industrial products and the human interfaces, however its scientific background and technological application is poorly understood. Here I focused on how human subject recognize brightness and self-luminosity of the target image by using several illusions. The glare illusion is an optical effect which induces brighter and shiny appearance of white surface. I found that the glare illusion was surprisingly robust across stimulus intensity. I also found that if properly colored inducer was used, the brightness enhancement was two folds comparing to the monochromatic one. Those effect of color was robust across stimulus hues, furthermore, we found there were two effective hues; red and blue. These results are not directly explained by the known perceptual effect, it would originate cortical mechanism of color and brightness perception. We also performed non-human primate study using high dynamic range display which enables to represent very bright and dark stimuli simultaneously. Preliminary experimental data shown that neurons in the inferior temporal cortex of the monkey coded both color and brightness information. These study would contribute understanding the visual function and mechanism for bright and self-luminose appearance would contribute to the effective design and human interface technologies.

1 はじめに

製品のデザインや装置のユーザーインターフェースでは、色と明るさを正しく配置することが重要である。正しいデザインによって利用者は快適な環境を得て、効率的な行動が可能になる。しかし、その設計は熟練したデザイナーが経験に基づいて創り出すことが一般的で、誰にでも利用可能なように「技術化」されていない。これを可能とするためには色や明るさの知覚や感性評価を客観的に測定し、それに寄与する画像の手がかりを定量的に分析することで、画像と認知の法則性を明らかにする必要がある。

グレア錯視と明るさ感覚

対象物や表示画像を明るく見せるためには何が必要だろうか。基本的には目に届く光の総量を増やせば良い。これは物体表面の反射率を上げたり、照明光を強めたり、画素の輝度を高めることで達成される。ところが、画像の輝度は一定のまま、明るさ感を増強することも可能である。その一つがグレア錯視と呼ばれる画像パターンである。グレア錯視は対象領域の周辺部位に輝度グラデーションを配置することによって、中央部の白色が明るく輝いて見える現象である(図1、2)(Agostini & Galmonte, 2002; Zavagno, 1999)。この画像パターンを応用することで、コンピューターグラフィックスでは画面の明るさ範囲を超えるような明るく輝いている対象物を表現することがある(Shinya, Saito, & Takahashi, 1989; Spencer et al., 1995)。しかし、その効果の度合いや色や輝度の寄与といった分析は極めて限定的で、背景となる神経生理学的なメカニズムも全く不明である。そこで本研究では、明るく輝いて見える現象について錯視的増強を誘導する画像手がかりについて調査し、ヒト心理実験により調査するとともに、脳神経メカニズムを調査するための動物実験の予備実験結果について報告する。

グレア効果はきわめて堅牢であり、刺激の輝度を変化させても効果が維持されているように見える(図1)。また、誘導刺激のグラデーションに適切に色を付けることに、効果は極めて強くなるようにも見える(図2)。筆者は、これらの現象について定量的に効果を測定し、既存の知覚現象と対応関係が得られるのかどうか検討を行うこととした。

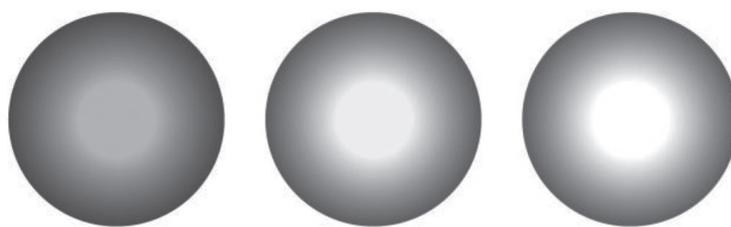


図1 グレア錯視画像の例。中央の白色部が明るく輝いて見える。左から順番に中央部の輝度に変化しており、右が最も強い。どの輝度条件であっても錯視効果による明るさ感の向上が起きていることが実験により確かめられた。

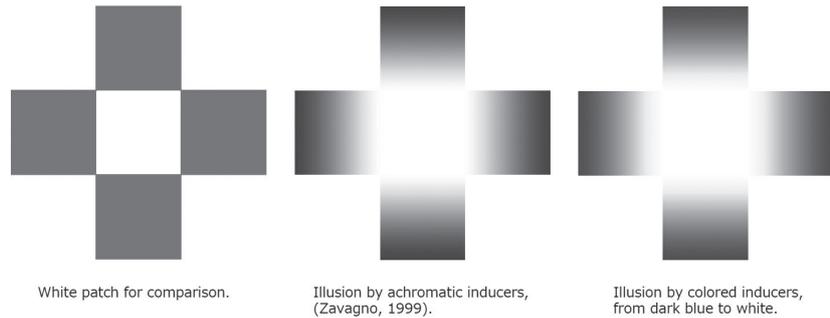


図2 別形状のグレア錯視(中央)と、色付けにより強力な錯視の増強が起こる例(右)
 ※右パネルはカラーである。 http://www.eiiris.tut.ac.jp/koida/ext/2015_hibi/

2 実験

実験1：輝度変調への堅牢性評価

グレア錯視は定量的に何%の輝度上昇に相当するのだろうか。また、背景画像の輝度を一定に保ったまま、刺激の輝度を変化させると錯視効果はどの程度変化するのだろうか。これを求める心理実験を行った。被験者はコンピューター画面に提示された二つの画像のうち、中央部の白色が明るく見える方を選ぶ課題を行う(図3)。刺激は一方がグレア錯視画像で、もう一方が参照用の一様刺激である。一様刺激には輝度が複数階調用意されており、二択の判断の繰り返しによって被験者にとって主観的に明るさが同程度に見える輝度上昇を求めることができる。

被験者8名で測定した結果、グレア錯視は約40%の輝度上昇に相当する明るさ感の向上を生むことがわかった($p < 0.05$, t-test)。さらに、刺激の輝度を変化させてもその効果量はおおよそ一定であることがわかった(図3)。刺激輝度が背景よりずっと暗い条件($< 50 \text{ cd/m}^2$)では調査結果にばらつきが大きく、上昇量が一定であるかは不明であるものの、コントロールよりも有意に明るく見えていることは確かであった($p < 0.05$, t-test)。以上の結果は被験者間で共通であり、グレア錯視が明るく見える現象は極めて堅牢であること、その効果には比率一定という法則性があることが見出された。

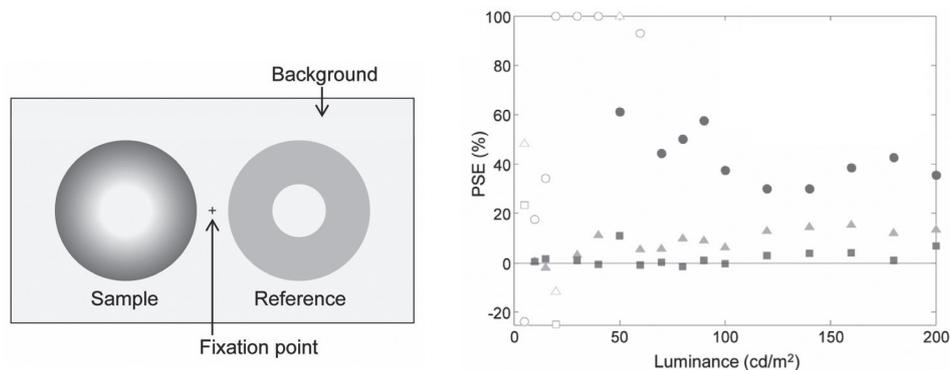


図3 実験1の刺激の見た目(左)とグレア錯視によって増強される明るさ感の向上の定量結果(右)。刺激は中央の白色部分と周辺のグラデーション部分(誘導刺激と呼ぶ)によって構成される。さらにディスプレイ全体を占める背景刺激が存在し 100 cd/m^2 の白色とした。横軸はサンプル刺激の輝度、縦軸は錯視によって上昇した明るさ感を参照刺激の輝度に対応つけて数値化したもの(PSE, point of subjective equivalence)。どの刺激強度であっても、明るさ感はおおよそ40%程度の上昇を示すことが分かった。

実験2：色の付加によるグレア錯視の増強

図2に示すように、グレア錯視に適切に色付けを行うことで極めて強い明るさ感の向上が起きることを発見した。この効果を定量的に測定するための心理実験を行った。被験者は錯視画像の見た目の明るさ感を参照画像の輝度を操作することで一致させるマッチング課題を行った(図4)。参照刺激は周辺の輝度グラデーションが無く一様のグレーとした。刺激画像として三種類用意し、周辺のグラデーション(誘導刺激)が青から水色を経て白に変化する条件(条件1)と青から直線的に白へ変調する条件(条件2)、黒から白へモノクロに変調する条件(条件3)について報告する(図4)。すべての実験条件において、色の有無にかかわらず刺激の輝度パターンは同一である。そのため刺激の輝度だけが明るさ感に寄与している場合は、実験結果に差は生じない。

10人の被験者によって調整された平均はモノクロ条件に比べて適切に彩色された条件(条件1)で優位に高く、二倍程度の明るさ感の向上となることがわかった(図4中央)。また、色の色相を変化させた条件で調べたところ、どの色相であってもモノクロ条件よりも明るく見えることがわかり、特に赤色相、青色相において強い明るさ感の向上が得られることがわかった。刺激に用いた12色相はCIELAB色空間から等しい彩度となる色度を選んでおり、色相依存性が彩度による効果の違いである可能性は低いと考えられる。

モノクロ画像と比較して、有彩色画像が明るく感じられる現象はヘルムホルツ・コールラウッシュ効果として知られている。今回発見された有彩色によるグレア錯視の増強効果が既知の効果として解釈可能であるか確かめるために、誘導刺激に用いた色刺激を無彩色で直接明るさマッチングを行うことでヘルムホルツ・コールラウッシュ効果を測定し、色によるグレア効果と比較した。その結果、色相依存性に相関性は見られたもののその程度は低かった(相関係数 $r = 0.37$)。また仮にヘルムホルツ・コールラウッシュ効果が起きたとしても、それは誘導刺激においてだけであり、グレア錯視が生じる中央部は白色であるため直接的に明るさ感を上昇させることを説明できない。以上から、色によるグレア錯視の増強は既知の効果では説明ができず、新しい知覚現象の発見であると言える。

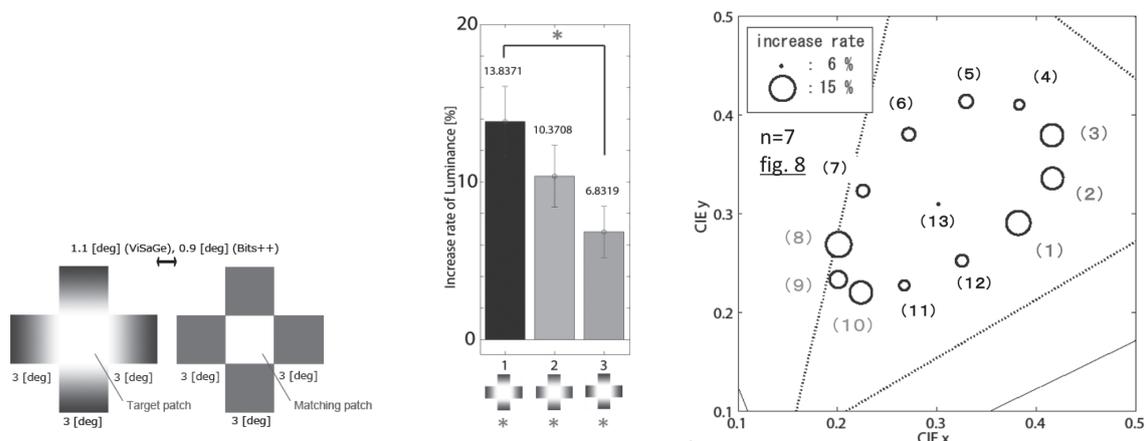


図4 実験2の刺激画像の見た目と、色の有無による効果(中央)、色相を変えた際の効果(右)。マッチングされた輝度の値を錯視量として定義し、中央図ではバーグラフ、右図でバブルプロットとして表示している。右図では12色相の有彩色刺激の色度点を示しており、誘導刺激はこの色度から白色に向かうグラデーションとして表示される。色相による効果を見えやすくするため、無彩色グレア錯視での錯視量からの差を円の大きさに示している。

3 明るさ感、輝き感を調査するためのデバイス開発

上記の心理実験では市販のパソコンディスプレイを用いて刺激提示を行っていた。一般的なディスプレイは黒から白まで、おおよそ $0.1\sim 100\text{ cd/m}^2$ の輝度変化として表示可能であるが、この範囲を超えた画像は白飛びしたり、黒く潰れてしまう。鮮やかな色を表示したい場合はその輝度範囲はさらに狭まり、赤色であれば $1\sim 20\text{ cd/m}^2$ 程度になる。本研究の目的である明るさ感、輝き感を調査するためには、極めて高い強度の画像刺激を表示できることが好ましい。

そこで私は、液晶ディスプレイと液晶プロジェクターを組み合わせることでコントラストを倍増させるハイダイナミックレンジ(HDR)ディスプレイ技術に着目した。HDRディスプレイの原理は単純であり、市販の液晶ディスプレイのバックライトを取り外し、液晶面の裏側にプロジェクターで光を投影することで実現できる(図5、写真)。液晶面とプロジェクターには同一の映像がパソコンから送り込まれており、両者の画像は1ピクセル単位でぴったりと一致させてある。その結果、画像の明るい部分では、液晶の透過率の高いピクセルに明るい光がプロジェクターによって照らされることになり、逆に画像の暗い部分は透過率の低いピクセルに暗い光が照らされることになる。その結果、 $0.01\sim 1000\text{ cd/m}^2$ という極めて広い輝度範囲で画像を表示できるようになった(図5)。

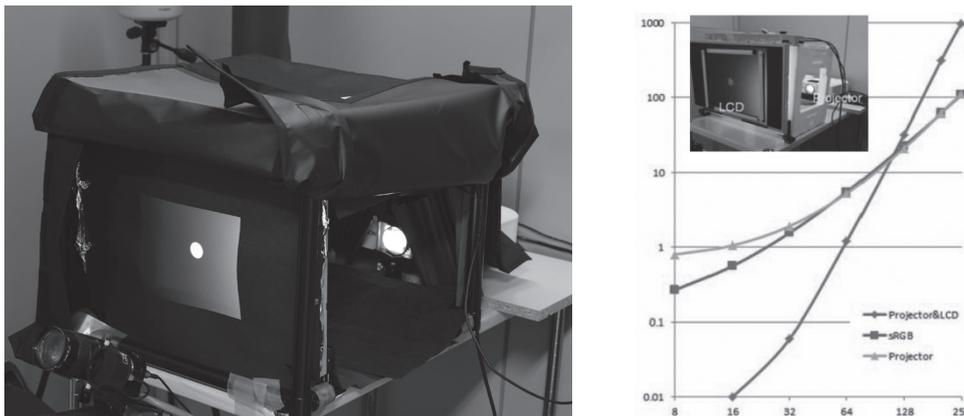


図5 幅広い輝度範囲で色選択性応答特性を調べるために作成したハイダイナミックレンジディスプレイ。バックライトを取り外した液晶ディスプレイの裏側に液晶プロジェクターから映像が投影されている。この装置によりこれまで調べることができなかった輝度範囲で心理実験、神経生理実験が可能になった。右図は画素入力値に対する表示輝度を示す。一般的なディスプレイと比較して、本ディスプレイが対数軸で2ユニット以上のハイコントラスト表示が可能であることを示している。

HDRディスプレイに画像を表示すると、コントラストのきわめて高い画像を見ることができる。都市の夜景や、燃えさかる炎、屋内から明るい屋外を撮影した映像などで特に印象深い。色票のような一様刺激を表示した場合は、非常に暗い黒から輝いている穴のような見えまでが再現できる。特筆すべきは明るい赤や青を表示したときで、ギラついた独特の見えが生じる。このような極端な色が「見える」ということは、それを表現しているニューロンが脳に存在することを示唆している。

4 神経生理学実験

次に私は、ヒトと同じ色覚を持っているサルを対象として刺激画像を見ているときにどのようなニューロン応答が得られるかを確かめる実験を行った。大脳の視覚野のなかで、下側頭皮質とよばれる部位は視覚認知と強い関係性があることが知られている。特に下側頭皮質の前方部には、色に

強く反応する細胞が寄り集まっている場所があり、これまで研究から色のカテゴリー認知や色判断との強い関係性が示されている (Komatsu, et al., 1992, Koida & Komatsu, 2007)。この領域のニューロンの色応答特性を調べることで、われわれの色認識の基盤となる情報表現を見出すことができるだろう。

実験では一様刺激と物体画像を用いた。一様刺激とは赤・緑・青の三角形で囲まれる広い色域からシステムチックに選び出した16色で、輝度4～5段階で設定した。物体画像とは色づけた物体写真で、表面がでこぼこした球体の陰影を保ったまま、一様画像と同じ色度に色づけた刺激画像である。ここで用いる刺激画像は錯視画像ではなく、輝度そのものが強いことから明るく輝いて見える刺激である。

覚醒下のサルからニューロン活動を測定した結果、多様性に富んだ色輝度応答特性が得られた。これまでの知見から予測されていたように輝度に依存しない不変的な色選択応答特性を示す細胞が見つかる一方で、特定の間強度の輝度だけで強く色応答する細胞(図6)や、極めて強い輝度刺激にのみ応答する細胞、輝度に応じて最適応答色相が変化している細胞も見つかった。陰影画像に対する色選択性応答はたいてい一様刺激の色選択性応答と類似していたが、一様刺激で輝度依存性がある細胞の場合その最適輝度での応答と類似していた。

このことは、下側頭皮質の細胞は色選択性だけでなく、明度もふくめた三次元空間内で鋭い選択性を持っていること、さらに物体の色を認識するときは様々な選択性を持つ細胞が連動して色認知を支えていることを示唆している。

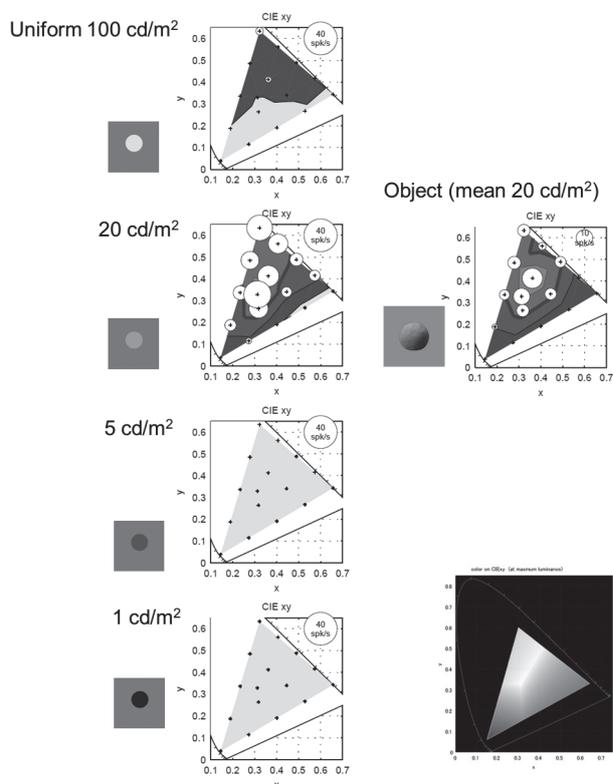


図6 一様画像刺激(左)と陰影画像刺激(右)に対する色選択性応答の例。各パネルは色を表現するCIE-xy色度図(右下)で、さまざまな色をサルに見せた時の細胞の平均発火頻度を白丸と等高線で示している。この細胞は白から緑色の色を好んで反応していた。さらに明瞭な輝度への好みがあり、輝度20 cd/m²に対してのみ強い応答を示していた。陰影画像に対しても類似した色選択性があった。このことは陰影に依存しない色情報を細胞が持っていることを示している。

4 まとめ

以上の研究から、錯視効果によって明るさ感や輝き感が増強される画像条件が発見され、また極めて高い輝度刺激を表示するデバイスにより直接的に輝き感を誘導することも可能となった。また、サルの大脳皮質下側頭皮質の神経細胞の発火パターンを調べることで明るさ感や輝き感を調査できる可能性を示唆した。これらの研究が進むことで、今後、明るさ感と輝き感についての視覚計算理論が構築可能となり、それを応用した画像表示デバイス、デザイン、ユーザーインターフェースなどに適用可能となることが期待される。

謝辞

本研究は以下のメンバーの協力により実現されました。中内茂樹教授、山岸理雄さん、田村秀希さん(以上、豊橋技術科学大学)、永井岳大准教授(山形大学)。

引用文献

Agostini, T., & Galmonte, A. (2002). A new effect of luminance gradient on achromatic simultaneous contrast. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(2), 264-269.

Koida, K., and Komatsu, H., (2007). Effects of task demands on the responses of color-selective neurons in the inferior temporal cortex. *Nature Neurosci*, 10: 108-116.

Komatsu, H., Ideura, Y., Kaji, S. and Yamane, S. (1992). Color selectivity of neurons in the inferotemporal cortex of the awake macaque monkey. *J. Neuroscience* 12: 408-424.

Shinya, M., Saito, T., & Takahashi, T. (1989). Rendering techniques for transparent objects. In *Proceedings of the Graphics Interface '89*, 173-181.

Spencer, G., Shirley, P., Zimmerman, K., & Greenberg, D. P. (1995). Physically-based glare effects for digital images. In *SIGGRAPH '95 Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 325-334.

Zavagno, D. (1999). Some new luminance-gradient effects. *Perception*, 28, 835-838.