

色恒常性のメカニズム

栗木 一郎

東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設
〒226 横浜市緑区長津田町4259

1. はじめに

眼球に入射した光は網膜において結像し、網膜に並ぶ光受容器に吸収されて初めて視覚情報として取り入れられる。網膜には光を吸収して信号に変える細胞が4種類あり、そのうち、明所視では主に3種類の錐体が使われている。3種類の錐体は図1のような分光感度を持っており、この3錐体の応答を成分とする3次元のベクトルが同一になるような光は、分光組成によらず同じ視覚情報として符号化されることになる。

しかし、同じ分光組成の光でありながら、空間的構成の違いによって同一の色に見える

い現象がある。例えば、同じグレイの紙であっても周囲が赤か緑かによって僅かに色の違いを感じるという色誘導現象である。同じ紙に同じ照明が当たっていれば等しい分光特性の光を反射するため、少なくとも錐体応答のレベルでは符号化される情報は等しいはずである。ただ、明らかな差を知覚するという事は、脳のあるレベルの信号では、この二つの領域から発生する信号が異なることを示している。つまり、色覚は、単に光のスペクトルに感応するフィルムやビデオ信号のような物ではなく、何らかの脳情報処理を経て生ずる感覚であるという事ができる。これは色覚に限らず視覚全般に共通した現象であるということが出来る。これから紹介する色恒常性はそのような視覚情報処理の典型的な例の一つであると言うことができる。

2. 色恒常性とは

日常、照明光の変化によって物体の色そのものが変わったと感ずることはない。例えば、リンゴを白熱電球と太陽光の下で見た時とで、リンゴ自体の色が変化したと感ずることはない(図2)。このような現象を“色の恒常性”あるいは“色恒常性”(color constancy)と呼ぶ。

図3に示すように、物体から視覚系に飛び込んでくる光は、あるスペクトルを持つ照明光 $I(\lambda)$ を物体表面の分光反射率 $R(\lambda)$ で反射した光 $S(\lambda)$ である。この関係は物体が自ら発光しない限り成立する。照明光が変化すると

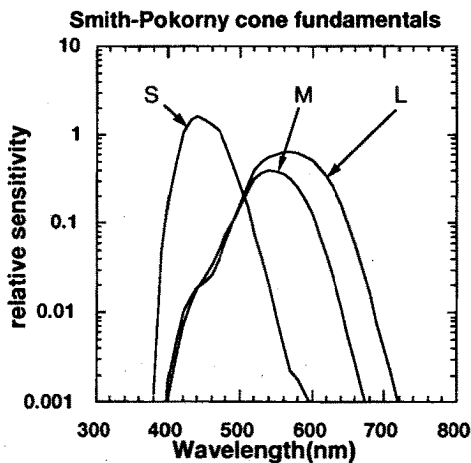


図1 Smith and Pokorny (1975)¹⁾による錐体感度曲線 (cone fundamentals)。L-, M- および S-錐体の感度の幅が広く、特にL-, M-錐体の感度曲線は重なっていて、波長分解能が悪いことが想像できる。

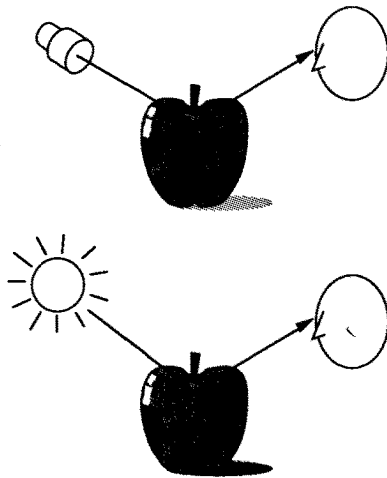


図2 照明光の変化に伴う色恒常性。日常、照明光の変化による物体からの光の変化を、我々は物体そのものの色の変化としてとらえることはなく、照明光の変化を正しく知覚している。

いうことは、照明光の含んでいるスペクトルが変化することを意味する。すなわち、物体からの光のスペクトルが変化しているにも関わらず一定した色を知覚する現象であるということが出来る。このような問題を最初に提起したのは von Helmholtz (1821-1894) であるといわれている。

具体的な例を挙げると、白熱電球は太陽光に比べると長波長光（赤い光）の成分を多く含んでいる。この場合、物体表面で反射されて視覚系に飛び込んでくる光のスペクトルが長波長領域で大きく変化し、このような変化は3錐体の応答パターンに大きな変化を引き起こす。しかしながら、物体の色に変化が感じられないことから、大脳を含めた視覚系において、この変化を補償して色恒常性を得るための情報処理が行われていることがわかる。

視覚系が何らかの方法で照明光のスペクトルを手に入れて、常に眼球に入射する光のスペクトルから照明光の成分を取り除いてやれば、視野内の物体の分光反射率の情報だけが得られることになる。もしこれが可能ならば、物体の分光反射率は照明光と関わりなく

一定であるから、完全な色恒常性が得られることになる。しかし、視覚系において色を符号化できる光受容器は3つしかないため、スペクトル情報は得られず、完全な色恒常性は理論的にも望むことができない。ただ、人間の視覚情報処理システムは、何らかの方法で完全な色恒常性に近いものを得ている。次に、その情報処理の過程における主な候補として挙げられている二つの基本的メカニズムについて述べてゆく。

3. 二つの基本メカニズム：色順応と空間的対比

3.1 色順応 (chromatic adaptation)

これは、照明光に対して視覚系が感度を変えて照明光の変化の成分を打ち消す現象である。前述のように人間には3錐体 (L-, M-, S-cone) が存在するが、例えば、それぞれが、現在刺激されている量に応じて感度を低下させる、という現象である。最も単純な von Kries のモデル²⁾を式に表すと、以下の通りになる。

$$L' = L / Lillum.$$

$$M' = M / Millum.$$

$$S' = S / Sillum. \quad (1)$$

ここで、 L' , M' , S' は感度変化後の錐体出力、 L , M , S は錐体の感度変化前の出力、 $Lillum.$, $Millum.$, $Sillum.$ は照明光に対する錐体の感度変化前の出力であるとする。式(1)が常に成り立てば、フラットな分光反射率を持つ表面（完全白色表面）については常に同じ錐体出力を生じ、色恒常性が成立する。このような照明光の変化に伴う感度変化に関する研究は、対応色の研究として様々な研究者によって研究されてきている。しかし、有彩色に関してはこれだけでは現象を説明することができず、非線形項の導入やパラメータの増加などの工夫がこれまで試みられている (Hunt, 1987³⁾; Nayatani et.al, 1995⁴⁾)。一方で、式(1)のような単純な線形の von Kries 型の変換でも十分説明できるという研究も最近になって現

れてきている (Brainard and Wandell, 1992⁵⁾; Chichiliski and Wandell, 1995⁶⁾).

3.2 空間的対比 (simultaneous contrast)

色順応が視野全体に含まれる共通の成分を差し引くメカニズムにあるのに対し、空間的対比は局所的な機構である。例えば、観察物体の表面で反射される光と、隣接する物体で反射される光との間で単純な比を取ることを考えてみる。

$$CL = L \text{ cent.} / L \text{ surr.}$$

$$CM = M \text{ cent.} / M \text{ surr.}$$

$$CS = S \text{ cent.} / S \text{ surr.} \quad (2)$$

ここで $\{L, M, S\} \text{ cent.}$, $\{L, M, S\} \text{ surr.}$ は観察対象と、それに隣接する表面に対する3錐体の応答を示している。例えば、照明光の変化に対する3錐体の応答の比が $\{kL, kM, kS\}$ であったと仮定すると、照明光の変化によって生ずる $\{L, M, S\} \text{ cent.}$, $\{L, M, S\} \text{ surr.}$ の増分は場所によらず $\{kL, kM, kS\}$ で共通なので、コントラストを計算することで、照明光の変化の影響が除去できる。しかし、物体の分光反射率の違いから、照明光の増分が必ずしも物体からの反射光の増分と等しくならないため、これも完全ではない。ただ、あるルールに従った補正を行うと、より高い精度で色恒常性が予測できることが分かっている

(Lucassen and Walraven, 1993⁷⁾).

3.3 二つ以上の基本メカニズムの存在理由

前節のように定式化してみると、式はいずれも同じ形をしており、一見するとあたかも同一のメカニズムを異なる現象として表現しているのに過ぎないように見える。しかしながら、色順応が見えに影響を及ぼすのに必要な時間が長いのに対し、空間的対比は極めて短時間で影響が生ずるなど、視覚系の感度変化と空間的な相互作用のメカニズムは時間的・空間的性質が全く異なるものである。

最近の研究で色順応による視覚系の感度変化が色の見えに影響を及ぼすまでには数十秒から数分の時間がかかるということが報告されているが、それでは照明光が瞬間的に切り替わったときにも生ずる色恒常性を説明することができない。そのため、色順応以外の瞬時的な視覚情報処理が必要であることが指摘されている。

ただ、色順応によって全ての視覚情報の入り口である光受容器、あるいは受容器の直後の信号が変化すると考えられることから、色順応の効果は色恒常性メカニズムの中である程度大きな役割を果たしていると考えられ、これを無視することはできない。一方で、同じ順応状態であっても、色誘導現象のよう

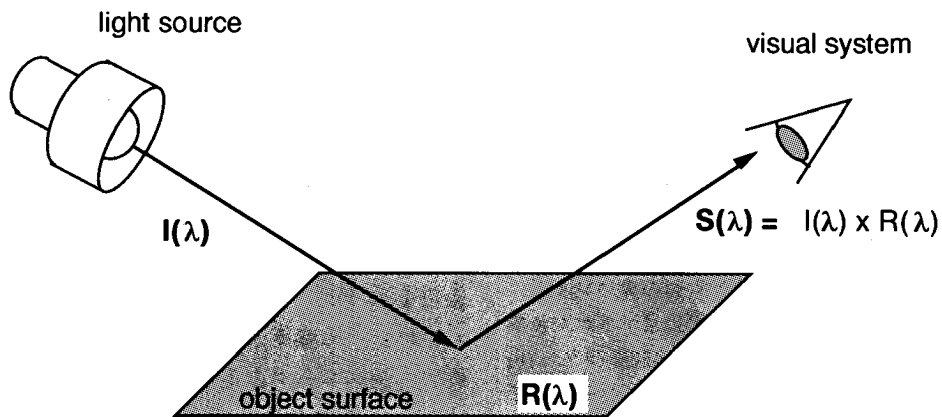


図3 物理的關係。物理量としての不変量は分光反射率の $R(\lambda)$ であり、計算科学的研究ではこの分光反射率 $R(\lambda)$ を入射光 $S(\lambda)$ から導出することを課題としている。しかし、図1のように人間にはスペクトルを得る能力はなく、必ずしも $R(\lambda)$ を導出しているわけではない。

に、物体の局所的な配置が色の見えに影響している可能性も無視できない。

したがって、これまでの研究のように、どちらか1つの基本メカニズムに依存した色恒常性メカニズムを考えるのではなく、二つ（あるいはそれ以上）の基本的なメカニズムが同時に作用していることを考慮しなければならないと考えられる。以下に、このような視点に立った我々の色恒常性メカニズムに関する最近の研究の一部を紹介する。

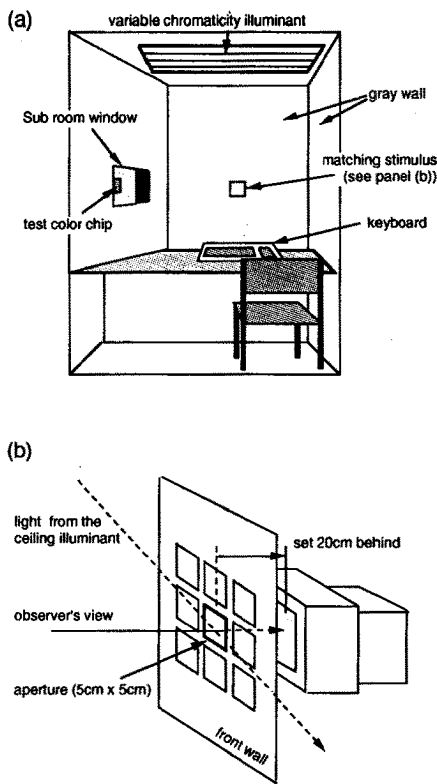


図4 実験装置。(a) 装置概観。実験1では天井の照明光の色が変化したときのユニーク白色を正面の壁の奥に設置したCRTモニター上に調整する。実験2では左手の壁面の奥に見える、独立な照明を持った小部屋に呈示された色票の色の見えをCRTで合わせる実験を行う。(b) 管面反射を起こさないように穴から離してCRTを設置した。被験者は両眼で観察するが、管面に表示する刺激は一樣なので両眼の視差を生じず、被験者は壁面に添付された色票と同じ感覚を生じた。

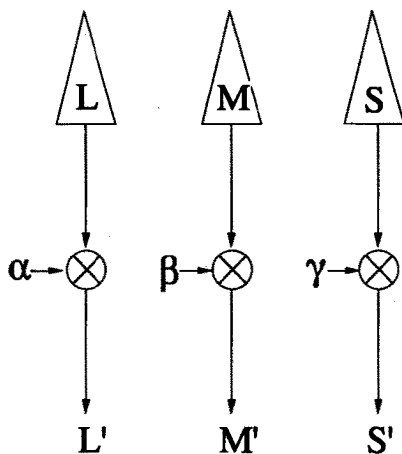


図5 von Kries 型感度調整機構。a, bおよびgは、ユニーク白色に対して $L' = M' = S'$ の応答を生じるように定義する。ここではL-, M-, S-錐体間の感度のバランスだけに着目するため、 $b = 1.0$ とし、aおよびgはbに対する比として再定義する。

4. 実験1：色順応による視覚系の感度変化

我々が日常的に体験する照明光の変化によって生ずる色順応の度合いを測るために、色がある程度連続的に変化する照明光を設置した、壁面がグレイの実験室を作成した。この部屋に入って実験を行うことで被験者は自らを完全に包み込む照明光に完全に順応することができ、感度変化の測定は壁面に埋め込んだ照明光の影響を受けないCRTディスプレイを用いて行う(図4)。

被験者は5分間照明光に順応した後、CRTディスプレイの色をユニーク白色に設定する実験を行う。ユニーク白色とは被験者に固有の、全く色みを感じない白色であり、これは色覚メカニズムの出力が0となる点、すなわち中立点であると考えられる。この中立点の変化を追うことによって、被験者のその時点での視覚系の感度が測定できることになる。被験者がユニーク白色を知覚する光に対してはL-, M-, S-錐体の出力が揃っていると仮定し、様々な照明光に順応したときの3錐体の出力のバランスの変化を観察する。

図5のような von Kries 型の感度調整機構を

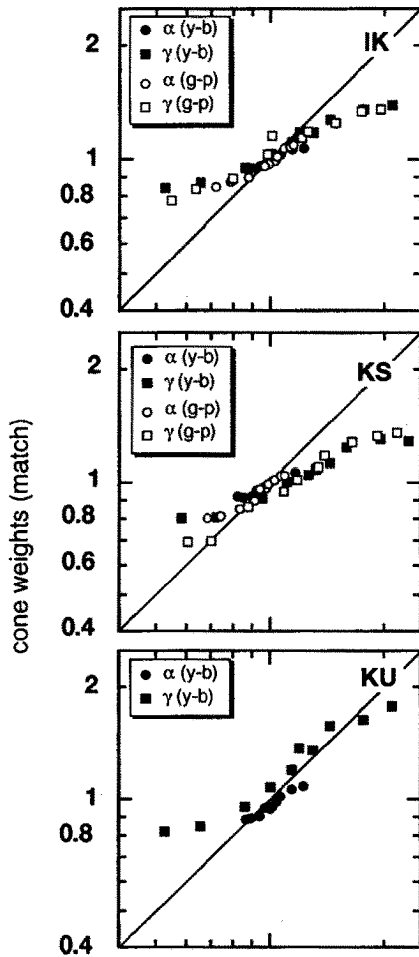


図6 錐体荷重 a および g による結果の表示。照明光の変化方向（黒シンボル：yellow-blue方向，白シンボル：purple-green方向）によらず同一の浅いS字型の曲線を描く。この結果は視覚系の感度の変化が彩度の高い照明には追従しないことを示している。

考え、3錐体の感度のバランスの指標として次のような錐体荷重 a, b, g を仮定する。

$$Lw' = a Lw$$

$$Mw' = b Mw$$

$$Sw' = g Sw$$

$$\text{s.t. } Lw' = Mw' = Sw' \quad (3)$$

ここで、 Lw, Mw, Sw はユニーク白色に対する3錐体の応答、 Lw', Mw', Sw' が感度変化後の

3錐体の応答、 a, b, g が錐体荷重である。色の見えは錐体応答のバランス、すなわち3次元の錐体応答空間におけるベクトルの方向によって表されると考えられるので、錐体荷重を以下のように再定義する。

$$b=1$$

$$a = Mw/Lw$$

$$g = Mw/Sw \quad (4)$$

以下、 a と g によってM-錐体に対するL-, S-錐体の感度の上下を調べることで色覚メカニズムの感度の変化を評価する。図6は、横軸に照明光がユニーク白色の見えを与えると仮定したときの a と g 、縦軸に3人の被験者のユニーク白色の結果から計算した a と g をプロットしたものである。原点は被験者が完全に暗順応したとき、すなわちどのような照明にも順応していないときのユニーク白色を表している。

もし被験者の視覚系の感度が照明光の変化に完全に追従していれば、照明光そのものが白く見え、シンボルは傾き1の直線上に乗るはずである。実験結果は浅いS字型の曲線を描き、3名の被験者とも横軸1付近では直線に乗っているが、あるところから感度変化が追従しなくなる傾向を示している。従って、白色についてさえ、色順応だけでは見えの色の色恒常性が成り立たないことを示している。

5. 実験2：空間的対比による効果

実験1においては、色順応による視覚系の感度変化が定量化された。色順応による効果以外の要素が空間的対比の効果であると考えると、実験1の結果から明らかな色順応以外の部分の色恒常性的シフトが空間的対比の成分となる。実験1の装置に改良を施し、2つの異なる照明光の下で色票が観察できるようにする。この2つめの環境下の色票の見えの色知覚をCRTで合わせる実験を行い、実験結果の中から色順応の効果を除去すれば、空間的対比の効果だけを抽出することができるこ

とになる。

実験1の装置の側壁に 11 deg × 8 deg の開口を設け、その奥に実験室と同じように色度に変化させられる照明光を設置する。予備実験によって、順応による視覚系の感度変化は実験室の照明光の色度によってほぼ決定されることが分かっている。

図7(a)は実験結果の一部をCIE $u'v'$ 色度図上に表したものである。被験者は小部屋にセットされた green の照明光の下で呈示された4枚の色票を観察し、被験者のいる部屋の照明が白色 (D_{65}) 照明光の時にマッチングした時と green の時にマッチング (apparent-color match) した結果の比較である。図7(b)は逆に色票は白色照明光の下に呈示され、被験者の部屋が green と白色に変化している。

図7で、○と□の灰色のシンボルは被験者の部屋の照明光が白色または green の時のユニーク白色の結果である。被験者が白色と感

じる光の色がシフトしているということは、被験者の視覚系の感度変化によって、色の見えの基準点であるべき白色が室内照明の変化によってずれていることを示している。従って、この色度図のままでは被験者の色の見えについて論ずることはできない。

そこで、式(3)、(4)で定義された錐体荷重 a 、 g を用いて感度変化による影響を補正することを試みる。ここでは、予め測定した cone plateau 時のユニーク白色に図7のユニーク白色をそろえるように a と g を計算し、図5の照明条件でのマッチング結果に同じ a と g を適用した。その結果を図8に示している。

図7と図8のそれぞれのパネルは窓の向こうの照明光が一定で、自分のいる部屋の照明光だけを変化させた実験条件での結果同士を比較している。従って、図7のようにシンボルが完全に重なるということは、自室の照明光の変化の影響は式(3)、(4)で定義されるよう

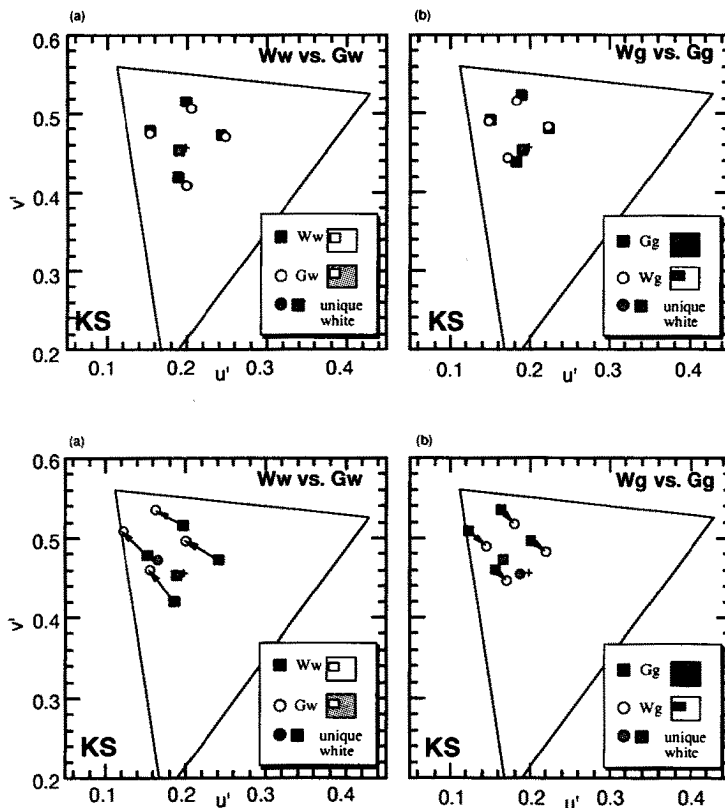


図7 対称・非対称マッチングの結果の一例。奥の部屋の照明光が同じであっても、自分のいる部屋の照明光の色度が変わると、矢印のようなマッチング結果の色度の変化が生じる。同時にユニーク白色のシフトも見られ、色度図のままでは被験者の色の見えを反映していないことが分かる。

図8 感度変化補正後の結果の一例。照明光の変化による視覚系の感度変化を錐体荷重 a と g によって補正した結果、奥の部屋の照明光が一定であれば安定した知覚を生じていることを示している。ここで成立する見えの色の恒常性には感度変化が要因として関与し得ないため、空間的相互作用の寄与が推測される。

な単純な von Kries 型の感度変化によって除去できることが分かる。今回の実験の他の照明光の条件でもこの錐体荷重 a , g による補正は精度良く成立した。

逆に、感度の変化が存在する状態で物理的に同じもの（同じ照明，同じ色票）に対する結果が一致したということは、空間的な情報の統合を行うメカニズムが存在し、何らかの戦略によって物理的に不変な情報を抽出していることを示している。現段階ではまだこの空間的な情報の統合メカニズムについては具体的に述べることはできない。

5. まとめ

これまで順応と空間的対比を色恒常性の主要因として紹介し、その色恒常性への寄与を論じてきたが、色恒常性メカニズムが必ずしもこれほど単純な feed forward 型の機構の組み合わせによって成り立っているとは考えにくい。日常的な状況を考えると、色恒常性を成立させているその他の要因として、記憶や、空間的構成の認識による feedback の介在が考えられる。

照明光の変化をはさんで色の見えを比較するという事は、物体の色を記憶している必要があるということであり、一度記憶された色が、記憶の中で変化しないか、という問題も影響すると考えられる (Jin and Shevell, 1996⁸⁾)。あるいは、一度太陽光の下である物体を見た時の色の見えが、別の照明光の下での色の見えに影響を及ぼしている可能性もある。Gilchrist (1978)⁹⁾ は、グレイスケールではあるが、同じ色票の明度の知覚が空間的な配置の認識によって変わって見える現象を報告している。このように、記憶や空間的な状況の把握といった高次の大脳情報処理も色恒常性に影響を及ぼしていると考えられる。

視覚系および視覚情報処理には様々な段階の出力があり、心理物理実験では被験者の実験課題によって錐体の感度変化よりも前段の応答や、あるいは記憶などの高次の応答を抽

出することができる。色恒常性の研究については、マッチングに代わる新たな実験手法の提唱や、統計理論をもとにした新たなモデルの提案が次々と報告されている (Craven and Foster, 1992¹⁰⁾; Bramwell and Hurlbert, 1996¹¹⁾; Brainard and Freeman, 1997¹²⁾)。今後の研究における課題は、新たな実験手法やモデルに基づいて脳内の様々なステージの出力をうまく抽出し、色恒常性メカニズムの全体像を明らかにしてゆくことであろう。

文 献

- 1) V. C. Smith and J. Pokorny: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15, 161-171, 1975.
- 2) J. von Kries: Die Gesichtsempfindungen. W. Nagel (ed): *Handbuch der Physiologie des Menschen*, 109-282, 1905.
- 3) R. W. G. Hunt: A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions. *Color Research and Application*, 12, 297-314, 1987.
- 4) Y. Nayatani, K. Takahama and H. Sobagaki: Prediction of color appearance of object colors in a complex visual field. *Journal of Light and Visual Environment*, 19, 5-14, 1995.
- 5) D. H. Brainard and B. A. Wandell: Asymmetric color matching: How color appearance depends on the illuminant. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 1433-1449, 1992.
- 6) E. J. Chichilinski and B. A. Wandell: Photoreceptor sensitivity changes explain color appearance shifts induced by large uniform backgrounds in dichoptic matching. *Vision Research*, 35, 239-254, 1995.
- 7) M. P. Lucassen and J. Walraven: Quantifying color constancy: evidence for nonlinear processing of cone-specific contrast. *Vision Research*, 33, 739-757, 1993.
- 8) E. W. Jin and S. K. Shevell: Color memory and color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 13, 1981-1991, 1996.
- 9) A. Gilchrist: Perceived lightness depends on perceived spacial arrangement. *Science*, 195, 185-187, 1977.
- 10) K. Craven and D. H. Foster: An operational approach to color constancy. *Vision Research*, 32, 1359-1366, 1992.

- 11) D. I. Bramwell and A. C. Hurlbert: Measurements of colour constancy by using a forced-choice matching technique. *Perception*, 25, 229-241, 1996.
- 12) D. H. Brainard and W. T. Freeman: Bayesian color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 14, 1393-1411, 1997.