



## Nagoya City University Academic Repository

学位の種類	博士（生体情報）
報告番号	甲第 1499 号
学位記番号	第 12 号
氏名	石 宝
授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日
学位論文の題名	照明変換による 2 色覚のための視認性改善に関する研究
論文審査担当者	主査： 田中 豪 副査： 鎌田 直子， 中村 篤， 本谷 秀堅

名古屋市立大学 博士学位論文

照明変換による2色覚のための  
視認性改善に関する研究

2015年

石 宝

名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科



# 要旨

近年、情報メディアの発展に伴い、人々が情報を取得しやすくなってきている。現代人の日常生活において、情報は非常に重要な部分を占めているのが現実である。日常生活において、多くの情報は新聞、テレビ、インターネットなどのメディアによる色情報により表現されている。すなわち、現在、色情報は情報伝達の重要な手段となっている。

しかしながら、色覚が正常ではない人に対しては、色を用いた情報が正しく伝わらないことがある。例えば、ある色覚異常者は、特定の赤と緑色を判別できない色覚特性を持つ。地下鉄の路線図でこのような特定の赤と緑色を用いて異なる路線を表示した場合、色覚異常者は判別できず、不便を感じることになる。

近年、色覚異常者の見えを改善するために、色覚バリアフリーを目的とした研究が行われている。その中で「光源スペクトルに着目した手法」が研究されている。この手法は、例えば壁に貼られたポスターに混同する色があった場合、適切な照明で照らすことで、色覚異常者にとって見分けられる色の組み合わせとする手法である。先行研究は、特定の物体（画像）に対して特定の照明を照らし、その見えを改善するだけである。物体によって見分けられる色として見えるための適切な照明は異なるが、その最適な照明を求める研究はまだされていない。

本論文では、混同する色を持つ物体ごとに色覚異常者にとって最適な照明（光源スペクトル）を求めるアルゴリズムを提案する。まず、最適な光源スペクトルを求めるアルゴリズムについて述べる。次に、実験により提案手法の有効性を確認する。

第1章は序論である。

第2章では、色彩科学の基礎知識について述べる。

第3章では、提案アルゴリズムについて述べる。最適な光源スペクトルを求めるためには評価関数が必要である。提案アルゴリズムでは、通常の照明下における正常色覚者での見え画像と最適照明下における2色覚者での見え画像が同程度のコントラストであることを保障できる適合度関数を定義する。

第4章では、第3章の評価関数を最適化するための遺伝的アルゴリズムとEMアルゴリズムについて述べる。更に、混合正規分布について述べ、混合正規分布のパラメータを推定する方法として最尤法について述べる。

第5章では、シミュレーション実験について述べる。まず、自由な分光スペクトル空間において、遺伝的アルゴリズムにより（準）最適照明を求める。しかし、最適スペクトルは多くのピークや細かい振動を持つことが多い。ヒトの目は、照明の分光スペクトルの細かな変化を区別できない。最

適スペクトルにおける重要なピークを残し，細かい振動を除去するために，EM アルゴリズムを用いて混合ガウス分布による近似を行う．しかし，近似した混合ガウス分布では適合度が低下することがある．この問題を解決するために，混合ガウス分布を用いた遺伝的アルゴリズムにより最適照明を求める．実験により，提案手法の有効性を検証する．

第 6 章は結論である．本論文の成果を総括する．

# 目次

要旨	3
第 1 章 序論	1
第 2 章 色彩科学の基礎知識	5
2.1 光と表面反射	5
2.2 視覚系の構造	6
2.3 色覚の種類	8
2.4 加法混色と等色関数	8
2.5 標準の光	11
2.6 均等色空間	14
2.7 ディスプレイにおける色再現	15
2.7.1 $\gamma$ 補正	15
2.7.2 RGB の色度補正	15
2.8 異なる照明下における正常色覚での見え	17
2.9 2 色覚での見えのシミュレーション方法	18
2.10 異なる照明下における 2 色覚での色の見えのシミュレーション方法	19
第 3 章 提案手法	23
3.1 局所コントラスト	24
3.2 適合度関数	24
3.3 提案手法におけるパラメータの役割	26
3.4 最適化	28
第 4 章 最適化アルゴリズム	29
4.1 遺伝的アルゴリズム (GA)	29
4.1.1 遺伝子の表現	29
4.1.2 適合度	30
4.1.3 スケーリング	30
4.1.4 遺伝的操作	31

4.2	EM アルゴリズム	31
4.2.1	混合正規分布	32
4.2.2	最尤法	33
4.2.3	EM アルゴリズムの手順	33
<b>第 5 章</b>	<b>実験</b>	<b>35</b>
5.1	適合度関数のパラメータ設定	35
5.2	色域調整	36
5.3	GA による最適化	39
5.3.1	パラメータ設定	39
5.3.2	実験結果	41
5.4	EM アルゴリズムによる最適照明の近似	49
5.5	混合ガウス分布を用いた GA による最適化	53
5.5.1	GA の設計	54
5.5.2	実験結果	55
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>61</b>
	謝辞	63
	引用文献	65
	発表論文	71
	用語集	75

# 第1章

## 序論

近年、情報メディアの発展に伴い、ヒトが情報を取得する手段はより豊かになって来ている。現在、新聞、テレビ、インターネットなどによる情報は、ヒトの日常生活を便利なものになっている。特に、21世紀に入り、ヒトの生活は情報から離れなくなっているのが現実である。例えば、地震速報により命を災害から守り、気象情報により飛行機等を悪天候から避け、道路標識により運転の安全と効率を保障するなど、枚挙にいとまがない。

外界からの情報は、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚の五感によりヒトに知覚されている。ヒトは、多くの情報が視覚に頼っている。すなわち、ヒトの目は情報を取得するために主な役割を果たしている。現在、視覚による得られる情報には、様々な色が用いられていることが多い。例えば、図 1.1 で示すように、地下鉄の路線図などは色の違いにより線を区別して表示することが多い。正常色覚者（正常3色覚者）にとって、色の違いにより表示した情報は日常生活を快適なものにしている。

しかしながら、これらの色の違いにより表現された情報は、色覚の違いにより正しく伝わらない場合がある。正常色覚者はL錐体、M錐体、S錐体の3種類の錐体を持っているが、その中の一つ以上の錐体が異常あるいは欠落となった場合、色覚異常になる。色覚異常者は特定の範囲の色について差を感じにくいという色覚特性を有している。図 1.1 の路線図について、赤-緑色覚異常者は赤と緑を区別できず、不便を感じる。アジア人男性の場合、約5%の人が色覚異常者である。世界中に色覚異常者は約2億人いる。ここで、よく問題となる「2色覚」を例として説明する。3種類の

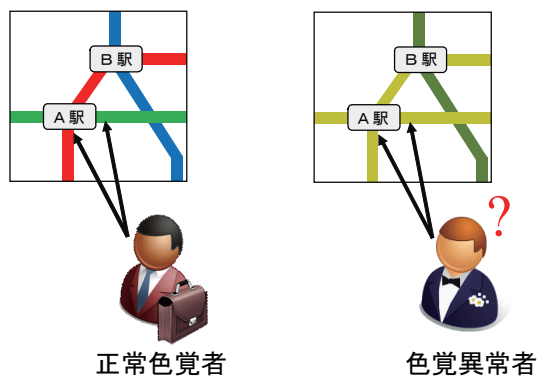


図 1.1 正常色覚者と色覚異常者における色の見えの例





図 1.2 配色パターンに着目した手法 (a) 原画像の正常色覚者における見え, (b) 原画像の 2 色覚者における見え, (c) 色変換後の画像の正常色覚者における見え, (d) 色変換後の画像の 2 色覚者における見え



図 1.3 光源スペクトルに着目した手法 (a) 照明 1 での見え, (b) 照明 2 での見え

錐体の内、いずれか一つを欠失している場合を 2 色覚という。L, M, S 錐体が欠落した場合それぞれ 1 型, 2 型, 3 型 2 色覚と呼ぶ。一番望ましいのは、医学的に治療できることであるが、現在の医療技術では色覚異常を治すことができない。

近年、色覚異常者に正常色覚者と同じような色情報を提供するように様々な工夫がなされている。例えば、商品の説明書や道路標識等を作る際、できるだけ色覚異常者に判別できる色を用いることが行われている。しかし、色覚異常者にとって判別できる色の組み合わせが正常色覚者にとって美しいものとは限らない。また、色覚バリアフリーのためのデザインが意識され出したのは最近のことであり、普及面では不足している。色覚異常者に正常色覚者と同じような色情報を提供するためには、幅広い研究が必要である。

これらの問題を解決するために、近年、色覚異常者の視認性改善を目標とした色覚バリアフリーのための研究 [1-28] が行われている。色覚バリアフリーの研究において、配色パターンに着目した手法 [1-23] や光源スペクトルに着目した手法 [24-28] がある。

配色パターンに着目した手法では、図 1.2 に示すように、原画像に色覚異常者にとって判別できない色の組み合わせがあった場合、判別しやすい色の組み合わせに変換することにより、色覚異常者の視認性を改善する。この手法は多くの場合有効であるが、ディスプレイの色域に依存し、表示できる色に限界がある。

照明が変わることにより、ヒトが感じる色も変わることが知られている。図 1.3 に示すように、光源スペクトルに着目した手法は、ある特定の照明により、物体が持つ判別できない色の組み合わせを見分けやすい色の組み合わせに変換するものである。この手法はディスプレイより幅広い色を 2 色覚者に見せることが可能である。色覚異常者が判別できない色を持つ物体に対し、色覚バリア

フリー照明により色覚異常者の視認性を改善することができる。色覚バリアフリー照明は一時的に使用するものであり、物体の色を塗り直すわけではないので、正常色覚者の見えには影響がない。

従来の光源スペクトルに着目した手法は、ある特定の物体に対し特定の照明で照らすことにより色覚異常者の見えを改善するものであるが、物体の色が異なると適切な照明は異なる。色覚異常の型により、最適照明も異なる。物体と色覚異常者の型ごとに自動的に最適な照明を求めるための研究はまだなされていない。

本論文では、物体ごとに最適な照明を自動的に求めるアルゴリズムについて述べる。

本論文は、六つの章から構成される。

第1章は序論である。

第2章では、色彩科学の基礎知識について述べる。

第3章では、提案手法について述べる。提案手法は、物体ごとに最適な照明を自動的に求める方法である。最適照明を求める際には、照明が2色覚者の視認性を改善しているか否かを判定するために基準を決める必要がある。提案手法では、通常照明での正常色覚者が感じるコントラストと同程度のコントラストを2色覚者にもたらず照明を良い照明とし、それを反映する評価関数を構築する。

第4章では、最適化アルゴリズムについて述べる。本研究で用いられる遺伝的アルゴリズムとEMアルゴリズムについて述べる。遺伝的アルゴリズムは、自然界の生物の進化を模倣した学習的アルゴリズムであり、その手続について述べる。EMアルゴリズムは不完全データに対し未知パラメータを推定するための手法である。更に、混合正規分布について述べ、混合正規分布のパラメータを推定する方法として最尤法について述べる。

第5章では、シミュレーション実験について述べる。提案した評価関数は解析的な最適化ができないので、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行う。また、得られた分光スペクトルの簡略化のためにEMアルゴリズムを用いた実験も行う。更に、混合正規分布と遺伝的アルゴリズムを用いた最適化についても実験を行う。実験により、提案手法の有効性を検証する。

第6章は結論である。本研究の成果を総括する。



## 第 2 章

# 色彩科学の基礎知識

本章では、本論文に関連する色彩科学の基礎知識について述べる。

### 2.1 光と表面反射

時間的に変動する同時に空間的に伝播する電磁場を電磁波という [29]。光は電磁波の一種である。電磁波において、電場ベクトルと磁場ベクトルと電磁波の伝播方向はお互いに直交している。電磁波の電場や磁場が 1 周期分変化する時間を周期といい、1 周期に伝播する距離を波長という [29]。電磁波には、波長により、長波、マイクロ波、赤外線、X 線などの様々な波がある。ヒトが光として知覚しているのは波長が約 380 nm~780 nm の光であり、“可視光”という [29–31]。可視光における各波長の光は、その波長特有の色に見えるのでその光を単色光という。虹の色は可視光における各波長の単色光の色である。光は、真空中からガラスなどの媒質に入ると、波長が短くなり、光の伝播する速さが遅くなる [29]。媒質中の速さと真空中の速さの比率を屈折率という。波長が異なると屈折率も異なる。異なる波長の光は屈折率も異なるという原理を利用することにより、プリズムを用いて光における各波長の色を見ることができる。図 2.1 で示すように、可視光において、赤は最大の波長を持ち、紫は最小の波長を持つ。電磁波はエネルギーを持ち、電磁波が伝播するときエネルギーも伝播する。単位時間に単位面積当たり伝播するエネルギーを強度という。

物体の表面に入射した光は、鏡面反射成分と拡散反射成分の 2 成分に分けられる。図 2.2 で示すように、鏡面反射成分は空気と物体の表面で起こる光の成分であり、拡散反射成分は物体における吸収や散乱により再び空気に出射する光の成分である [32]。例えば、図 2.3 で示すりんごの光って見える部分は鏡面反射成分であり、赤い色は拡散反射成分である。物体の表面における波長  $\lambda$  での反射率  $\hat{R}(\lambda)$  は

$$\hat{R}(\lambda) = \frac{\hat{D}(\lambda)}{S(\lambda)} \quad (2.1)$$

で得る [32]。ここで、 $\hat{D}(\lambda)$  は物体の波長  $\lambda$  での拡散反射強度を表す。 $S(\lambda)$  は入射光の波長  $\lambda$  での強度である。分光器を利用することにより、分光反射率  $\hat{R}(\lambda)$  を求めることができる。実際に分光反射率を計測する場合は、拡散反射のみを計測するために、鏡面反射成分を計測しないようにして

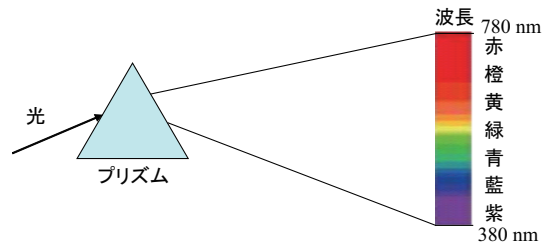


図 2.1 光のスペクトル

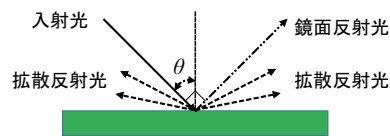


図 2.2 物体の表面での反射過程



図 2.3 りんご

いる．物体により分光反射率が異なる．物体における色の物理的な性質は，分光反射率によりほぼ決まる [32]．

## 2.2 視覚系の構造

図 2.4 ではヒトの目の構造を示す．目に入射した光は，硝子体を透過し，網膜に投影される．網膜には，厚さが約 0.25mm の薄い膜状の神経組織がある．図 2.5 で示すように，網膜には，視細胞，水平細胞，双極細胞，アマクリン細胞，遠心性繊維，神経節細胞など細胞が存在し，それぞれ自分の機能を持っている [33]．網膜に投影された光は視細胞で電気的な信号に基づいた像に変換され，視神経を経て脳に送られる．

視細胞はその形態から杆体（かんたい）と錐体（すいたい）の 2 種類に分類される [33]．杆体細胞は主に明るさに反応する細胞であり，暗所のみで機能する．一方，明所において，錐体細胞が機能し，色の知覚に対して錐体が関係する．光刺激を電気的な信号に変換する細胞の内，約 95% が杆

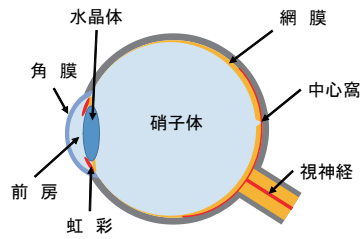


図 2.4 ヒトの目の構造

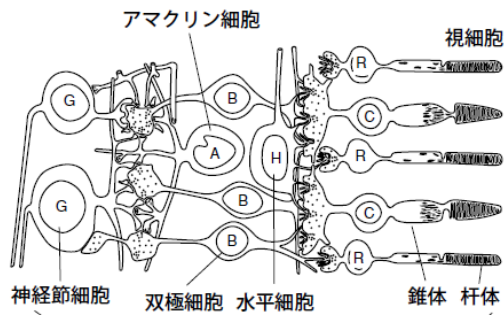


図 2.5 網膜の構造 [33]

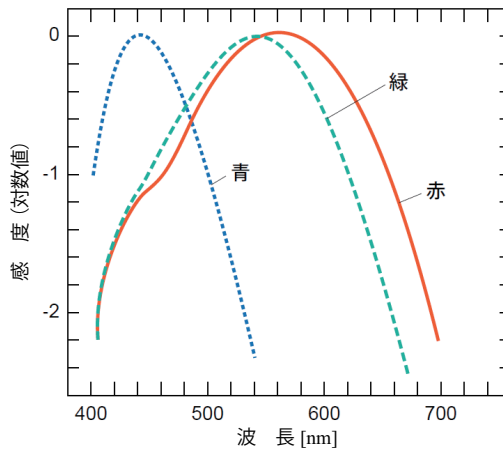


図 2.6 L, M, S 錐体の基本感度関数 [33]

体であり，残りの 5% が錐体である [34]．錐体には，分光吸収特性が異なる 3 種類の錐体細胞がある．その 3 種類の錐体細胞は，それぞれ長波長，中波長，短波長の光を知覚する L 錐体，M 錐体，S 錐体である．図 2.6 に各錐体の基本感度関数を示す．図 2.6 において，L 錐体と M 錐体のピークが非常に近いことが分かる．

## 2.3 色覚の種類

L, M, S 錐体がすべて正常な場合、正常色覚と呼び、正常 3 色覚とも呼ぶ。3 種類の錐体細胞において、一つ以上の錐体が異常の場合、異常 3 色覚と呼ぶ。異常 3 色覚において、L 錐体が異常の場合、1 型 3 色覚と呼ぶ。M 錐体が異常の場合、2 型 3 色覚と呼び、S 錐体が異常の場合 3 型 3 色覚と呼ぶ。3 種類の錐体細胞において、いずれ一つが欠落となった場合、2 色覚と呼ぶ。その欠落となった錐体が L 錐体の場合、1 型 2 色覚と呼ぶ。M 錐体が欠落した場合、2 型 2 色覚と呼び、S 錐体が欠落した場合、3 型 2 色覚と呼ぶ。二つの錐体が欠落した場合、1 色覚と呼ぶ [30]。本論文では、正常色覚を N で表し、2 色覚を K で表す。1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚をそれぞれ P と D で表す。図 2.6 において、L 錐体と M 錐体の波長域が近いが、L 錐体がわたる波長の範囲は M 錐体より少し広い。1 型 2 色覚者の場合、長波長の錐体が欠落され、特に赤色に対し、知覚する色の見えが 2 型 2 色覚者が知覚する色の見えより暗い。

視物質は、オプシンと呼ばれる視物質タンパク質とビタミン A 誘導体である。杆体にはロドプシンが存在し、赤、緑、青錐体にはそれぞれ赤オプシン、緑オプシン、青オプシンが存在する。ロドプシンと青オプシンは 348 個のアミノ酸からなる。ロドプシンは第 3 染色体に存在し、青オプシンは第 7 染色体に存在する。一方、赤オプシンと緑オプシンをコードする遺伝子はどちらも X 染色体に存在する [33]。赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の構造が似ており、両方 6 個のエクソンからなる。アミノ酸のコードする仕方は赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の分光吸収特性の違いに関係する。

ロドプシン遺伝子を含む染色体と青オプシン遺伝子を含む染色体は男性も女性も二つ持っている。一つが異常になっても、残りの一つが正常であれば、正常色覚である。赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子は X 染色体に存在し、女性は二つ持っているが、男性は一つしか持っていない。男性の場合、一つが異常であれば、色覚異常になる。これは、なぜ男性の色覚異常の確率が女性より高いの原因である。色覚異常の中、最も多いのは 1 型と 2 型色覚異常であり、すなわち、赤-緑色覚異常である。白人男性の内、8% が赤-緑色覚異常者であり、アジア人男性の場合は約 5% が赤-緑色覚異常者であり、黒人男性の約 4% が赤-緑色覚異常者である [34]。世界中に赤-緑色覚異常者は約 2 億人いる。

## 2.4 加法混色と等色関数

赤、緑、青の三つの単色光を重ね合わせ、強度を調整することにより、多くの色を再現することができる [31,32]。図 2.7 で示すように、赤、緑、青の単色光を重ねたところが、白色に見える。その三つの光を原刺激という。原刺激は必ずしも赤、緑、青ではなくてもよい。ただし、二つの原色の加法混色が残りの色と同じになってはいけない。すなわち、三つの原刺激は独立な刺激でなければならない。

図 2.8 は等色実験の様子を示す。暗箱を仕切りにより上と下に分ける。上のところに互いに独立

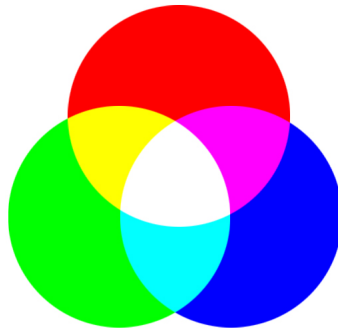


図 2.7 加法混色

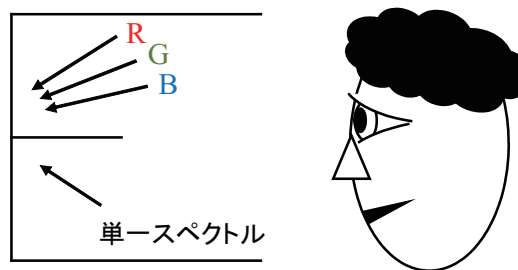


図 2.8 等色実験

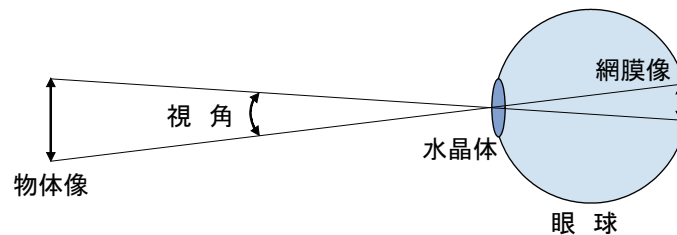


図 2.9 視覚と網膜像

な単色光で照らす。したがって、その単色光は強度を調整できるようになっている。暗箱の下の部分に任意の光を当てる。上の三つの単色光の強度を調整した混色が下の色と同じの場合、上下の色は等色条件を満たしているという。等色実験において、錐体だけに光が当たるようにする必要がある。等色実験における視野のサイズが $2^\circ$ でなければならない。視野が $2^\circ$ 以上になると杆体にも光が当たり、現象がより複雑になる。図 2.9 に示すように、物体の両段と水晶体のなす角を視角と言う。

国際照明委員会 (CIE) の標準では、等色実験で用いられる単色光は赤の原色光 R として ( $\lambda = 700$  nm) の単色光、緑の原色光 G として ( $\lambda = 546.1$  nm) の単色光、青の原色光 B として ( $\lambda = 435.8$  nm) の単色光である [30,31]。図 2.10 では、CIE 1931 *rgb* 等色関数を示す。等色関数において負の部分があることが分かる。これは、図 2.8 のような等色実験ではこの関数は求まらないことを示している。負の部分は、仕切りの上の三原色をどう調整しても、下の色と同じに見えない、赤色の



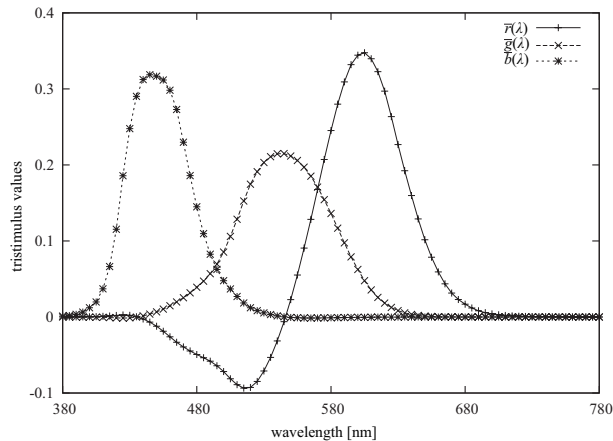


図 2.10 CIE 1931 rgb 等色関数

単色光を下に照らすと，上部における残りの二つの単色光における混色と同じに見える．この下半分に与えた原色の強度が負の量として表されている．選ぶ三原色が異なると混色により再現できる色の範囲は異なる．その再現できる色の範囲を“その原色の色再現域”という [31]．

三原色を決めれば，それにより定まる等色関数によって三刺激値を表すことができる．しかし，色を定量的に表すには，何かの標準によって決める必要がある．CIE は 1931 年に 2° 視野の XYZ 系を定めた．等色関数  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  は  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  を線形変換したものでり，は以下のような条件を満たすよう決められた．

1.  $\bar{y}(\lambda)$  は標準分光視感効率  $V(\lambda)$  に一致する．
2.  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  は，可視域にわたって正の値を持つ．
3.  $\bar{z}(\lambda)$  の値は，波長が 650nm を超えると 0 である．
4. 波長が 505nm のとき， $\bar{x}(\lambda)$  の値がほとんど 0 である．
5. 可視域の短波長において， $\bar{z}(\lambda)$  の値が  $\bar{x}(\lambda)$  と  $\bar{y}(\lambda)$  の値より大きい．

図 2.12(a) では CIE 1931 XYZ 表色系の等色関数を示す．CIE 1931 XYZ 表色系を用いることにより，色光の色は三刺激値

$$\begin{cases} X = \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \\ Y = \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \\ Z = \int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (2.2)$$

で表すことができる．一方，色光を明るさを表す輝度と色成分を表す色度に分けることができる．

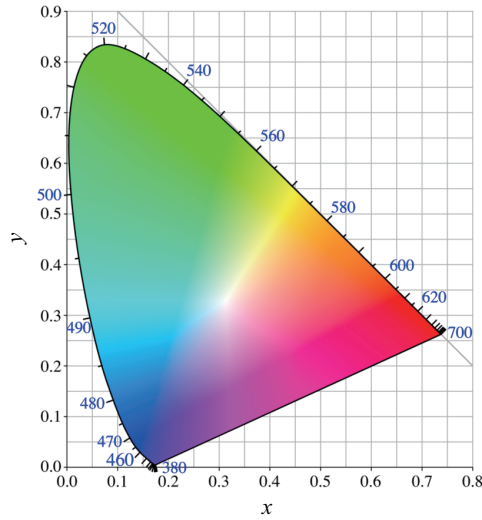


図 2.11  $xy$  色度図 [38]

色度は

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (2.3)$$

で定義される．ある原色における色の再現範囲を示すとき，色度はよく用いられる．単色光の色度  $x(\lambda)$  と  $y(\lambda)$  は

$$\begin{cases} x(\lambda) = \frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}, \\ y(\lambda) = \frac{\bar{y}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \end{cases} \quad (2.4)$$

となる．図 2.11 に CIE 1931  $xy$  色度図を示す．色度図の形が馬蹄に似ていて，単色光は色度図の周りに分布する．波長が 380 nm と 780 nm に結ぶ単色光は存在しないが，加法混色実験により実現できる．

視覚の専門分野において，図 2.12(b) で示す Judd の修正等色関数 [36] を用いているが，工学分野において標準化し活用されてきたものを容易に変換できないので，CIE 1931 XYZ 表色系の等色関数を用い，色を定量的に表している [32]．

## 2.5 標準の光

真昼と夕焼けのとき，風景の色が変わる．それは，照明の分光エネルギー強度が変わるにより対象物体の色も変わって見えるからである．物体の色を測定するために，光源として使う白色光を定義

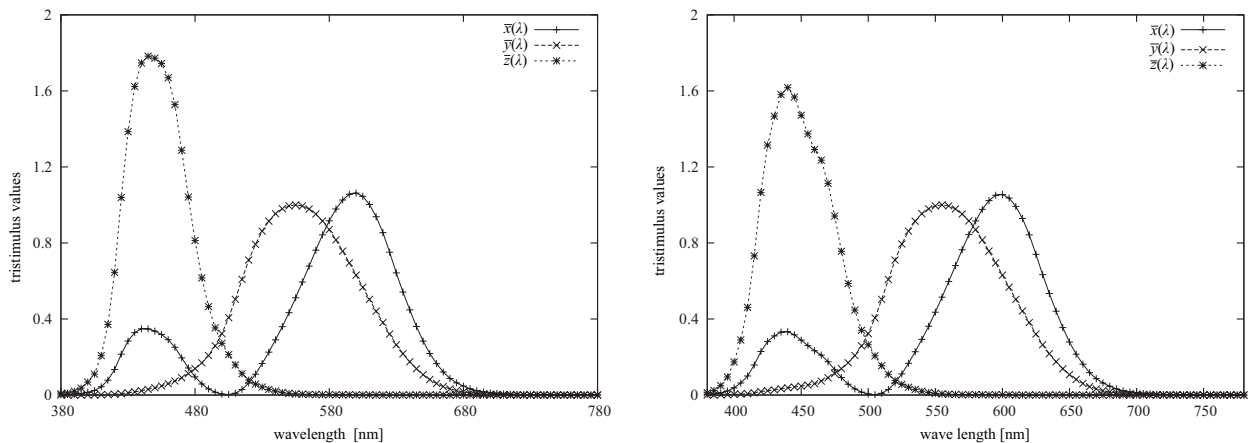


図 2.12 等色関数 (a) CIE 1931 XYZ 表色系の等色関数, (b) Judd の修正等色関数

する必要がある。測色用の光としてよく知られているのは、CIE が 1931 年に定めた標準 A, B, C 光源と 1964 年に定めた  $D_{55}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{75}$  である。以下は、通常よく用いられる標準光源について述べる。

等エネルギー白色光とは全ての波長にわたって同じ分光エネルギー強度を持つ白色である。

完全放射体（黒体）は、熱せられた物質が熱平衡の状態、光を輻射するものである [31]。完全放射体の分光エネルギー分布は

$$S(\lambda, T) = c\lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (2.5)$$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K} \quad (2.6)$$

で表す [30]。ここで、 $T$ ,  $\lambda$  はそれぞれ絶対温度、波長を表す。係数  $c$  には任意の定数を用いることができる。ある物体（からの可視放射）の色度が絶対温度  $T$  の黒体の色度と同じとき、 $T$  を色温度という。一般の放射体の色度は黒体の色度と異なることがある。その場合、色度図において最短ユークリッド距離にある黒体の絶対温度を用いて、それを相関色温度という。相関色温度は絶対温度ではない。たとえば、相関色温度や色温度が 6,000 K の蛍光灯は絶対温度が 6,000 K になっているわけではない [29]。

標準 A 光源は、約 2,856 K の黒体放射の相対分光エネルギー分布である [29]。それが同じ色温度の白熱電球の光を代表する。標準 B 光源は、標準 A 光源に液体フィルタをかけて、太陽の表面を模した光であり、色温度が 4,874 K の光である。標準 C 光源は、標準 B 光源と同じように標準 A 光源に液体フィルタをかけて、平均昼光を代表するものであり、色温度が 6,774 K の光である。図 2.13 では、標準 A, B, C 光源の相対分光エネルギー分布を示す。

物体の色を測定する場合、物体に標準 A, B, C 光源をあてて測定するより、反射率、透過率を測定し、光源の分光エネルギーに対する重みとして計算するのが普通である。CIE の標準 D 光源は、米国、カナダ、英国で行われた北空についての自然昼光を測定し標準とした光源である。日の出後 2 時間から日の入り前 2 時間の昼間に、平均に置いた表面を照射する光の平均を  $D_{65}$  としてい

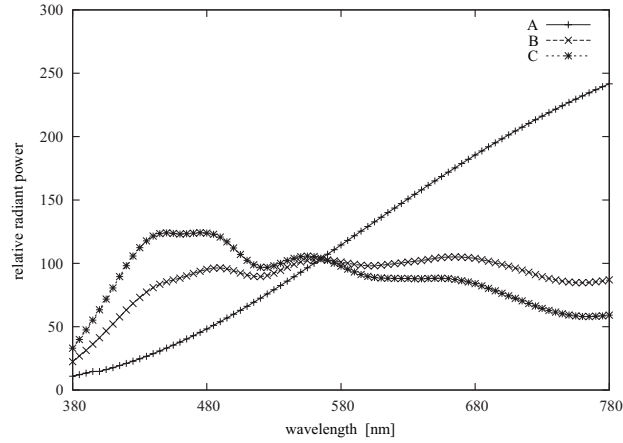


図 2.13 CIE 標準 A, B, C 光源

る。D<sub>65</sub> は、色温度が 6,500 K の標準 D 光源を表す。実測された平均的相対分光スペクトル分布は次式で近似される。

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda). \quad (2.7)$$

ただし

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341}, \quad (2.8)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341} \quad (2.9)$$

である。ここで、 $S_0(\lambda)$ ,  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$  はそれぞれ実測された相対エネルギー分布の平均、第 1 主成分、第 2 主成分を表す。 $x_D$  と  $y_D$  は実測された昼光の  $x$ ,  $y$  色度座標であり、相関色温度  $T_{cp}$  から次のように計算される。

1. 約 4,000 K <  $T_{cp}$  < 約 7,000 K

$$x_D = -4.6070 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.244063. \quad (2.10)$$

2. 約 7,000 K <  $T_{cp}$  < 25,000 K

$$x_D = -2.0064 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 1.9018 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.24748 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.237040, \quad (2.11)$$

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275. \quad (2.12)$$

図 2.14 では、異なる相関色温度の標準 D 光源の分光エネルギー分布を示す。CIE では D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub>, D<sub>75</sub> が推奨されており、印刷物では D<sub>50</sub> が推奨されている。

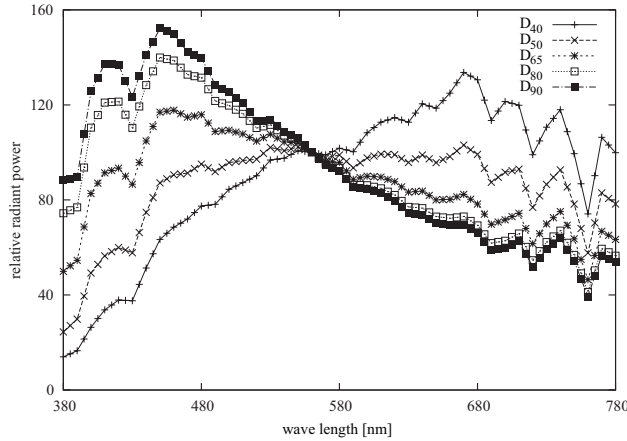


図 2.14 CIE 標準 D 光源

## 2.6 均等色空間

XYZ 表色系は CIE の標準表色系として規定されたものであるが、XYZ 表色系により規定された色空間における 2 点間の距離はヒトが実際に知覚する色の差を反映できないという欠点がある。ヒトが感じる色の差を均等に反映するように CIE 均等色空間が定められた。ここで、CIE 均等色空間として 1976 年に定義された CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色空間について述べる。なお、 $L^*a^*b^*$  色空間は CIELAB 色空間とも呼ばれる。

$L^*a^*b^*$  色空間における  $L^*$  は

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_n)^{(1/3)} - 16, & Y/Y_n > 0.008856, \\ 903.29(Y/Y_n), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.13)$$

で定義される。ここで、 $Y$  はある色の  $Y$  刺激値を表し、 $Y_n$  は標準の光下における完全拡散反射面の  $Y$  の刺激値である。 $L^*$  は CIE 1976 明度といい、 $[0, 100]$  の値を持つ。 $a^*$  と  $b^*$  は

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \quad (2.14)$$

$$b^* = 500[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (2.15)$$

で得る。ここで、

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{(1/3)}, & \alpha > 0.008856, \\ 7.78\alpha + 16/116, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.16)$$

である。CIE  $L^*a^*b^*$  色空間における二つの色の差  $\Delta E_{ab}^*$  が

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.17)$$

で定義される。

## 2.7 ディスプレイにおける色再現

異なるディスプレイ間においても、同じ物体が異なる色に表示されることがある。その場合、物体がもつ元の色をディスプレイに表示することが望まれる。このように元の色を再現することを色再現という。本節では、色再現の基礎的な知識としてディスプレイの色再現について簡単に述べる。

### 2.7.1 $\gamma$ 補正

ディスプレイの表面に、赤 (red : R), 緑 (green : G), 青 (blue : B) の発光点が基盤の目のように並んでいる。Cathode ray tube (CRT) ディスプレイの場合は、これら陰極線管における発光点が三つの蛍光体を使用している。実際に蛍光体にかかる電圧  $V$  と輝度  $I$  の関係式は

$$I = kV^\gamma \quad (2.18)$$

である。式から分かるように、かける電圧と輝度は比例しない。このような非直線性を示す特性を  $\gamma$  特性という。CRT ディスプレイの  $\gamma$  特性を逆補正した信号で CRT ディスプレイを操作しないと R, G, B の各蛍光体は期待した明るさで働かない。例えば、sRGB ディスプレイの場合、非線形値 ( $R'_{8bit}, G'_{8bit}, B'_{8bit}$ ) から線形値 ( $R, G, B$ ) を求める式を  $R$  を例にして説明する。 $R$  は

$$R = \begin{cases} \frac{R'_{sRGB}}{12.92}, & R'_{sRGB} \leq 0.03928, \\ \left( \frac{R'_{sRGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$R'_{sRGB} = \frac{R'_{8bit}}{255} \quad (2.20)$$

で得る。逆に、線形値 ( $R, G, B$ ) から非線形値 ( $R'_{8bit}, G'_{8bit}, B'_{8bit}$ ) を求める式は

$$R'_{sRGB} = \begin{cases} 12.92R, & R \leq 0.00304, \\ 1.055R^{(1.0/2.4)} - 0.055, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$R'_{8bit} = 255R'_{sRGB} \quad (2.22)$$

である。

### 2.7.2 RGB の色度補正

表 2.1 で示すように、ディスプレイの種類や蛍光体によって R, G, B 三原色の色度は異なる。図 2.15 の色度図では、sRGB と NTSC 規格によるディスプレイの色を再現範囲を示す。色を正しく表示するために R, G, B の色度を補正する必要がある。三原色の色度と白色の色度を用いて ( $R, G, B$ ) と ( $X, Y, Z$ ) の関係式を求めることができる。

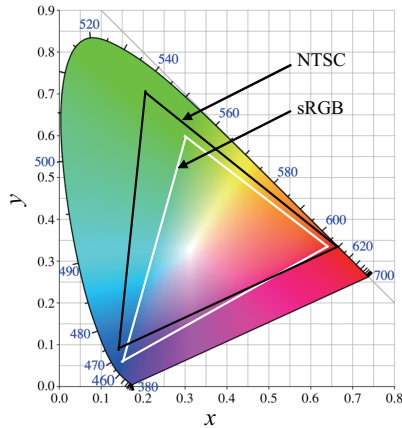


図 2.15 色再現域の違いの例

表 2.1 NTSC, SMPTE および sRGB カラーテレビの原刺激と基礎刺激の CIE $xy$  色度 [29]

	NTSC		SMPTE		sRGB	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
原色 R	0.67	0.33	0.63	0.34	0.64	0.33
原色 G	0.21	0.71	0.31	0.60	0.30	0.60
原色 B	0.14	0.08	0.16	0.07	0.15	0.06
白色 W	0.310	0.316	0.313	0.329	0.3127	0.3290
	標準 C 光源		標準 D <sub>65</sub> 光源		標準 D <sub>65</sub> 光源	

ここで、説明を簡単にするため、 $R, G, B$  の値を 0 から 1 の値に規格化し、 $R = G = B = 1$  のとき  $Y = 1$  で白の色度が得られるように較正されているとする。そうすると、 $(R, G, B)$  から  $(X, Y, Z)$  への変換式が

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_R x_R & m_G x_G & m_B x_B \\ m_R y_R & m_G y_G & m_B y_B \\ m_R z_R & m_G z_G & m_B z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

となる。ここで、 $z = 1 - x - y$ 、 $m_R, m_G, m_B$  は定数であり、これらの定数を求めれば、変換式を求めることができる。

ここで、sRGB を例にして、RGB から XYZ への変換式を以下で示す。

表 2.1 を用いると、式 (2.23) は

$$\begin{cases} 0.64m_R + 0.30m_G + 0.15m_B = \frac{x_W}{y_W} = 0.9505, \\ 0.33m_R + 0.60m_G + 0.06m_B = 1, \\ 0.03m_R + 0.10m_G + 0.79m_B = \frac{1}{y_W} - \frac{x_W}{y_W} - 1 = 1.0891 \end{cases} \quad (2.24)$$

となる。この式と解くと

$$m_R = 0.6444, \quad m_G = 1.1919, \quad m_B = 1.2033 \quad (2.25)$$

を得る。この値を式 (2.23) に代入することにより、sRGB から XYZ への変換式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

が得られる。式 (2.26) の逆変換は

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

となる。

## 2.8 異なる照明下における正常色覚での見え

異なる照明下における正常色覚者の見えをシミュレーションする方法としてカラーコンスタンシー理論が研究されている [59]。カラーコンスタンシー理論では、異なる照明下における三刺激値を計算するために、対象画像における各色の分光反射率  $\hat{R}(\lambda)$  を推定する必要がある。

まず、照明 1 下での見え画像における三刺激値  $(X^{(1,N)}, Y^{(1,N)}, Z^{(1,N)})$  から各色の分光反射率  $\hat{R}(\lambda)$  を求める方法について述べる。分光反射率  $\hat{R}(\lambda)$  は少数の独立な成分により表すことができる。すなわち、 $\hat{R}(\lambda)$  は

$$\hat{R}(\lambda) = r_0(\lambda) + a_1 r_1(\lambda) + a_2 r_2(\lambda) + a_3 r_3(\lambda) \quad (2.28)$$

で表せる。ここで、 $r_k(\lambda)$  は多くの物体の表面反射率を集め [60]、その主成分分析から得られた基底ベクトルである。 $r_0$  は平均ベクトルであり、 $r_1 \sim r_3$  はそれぞれ第 1～第 3 主成分ベクトルを表している。 $a_k$  は各基底ベクトルの重み係数であり、物体の色を表現する未知特性パラメータである。基底ベクトル  $r$  は対象物体により異なる。例えば、印刷物の分光反射率を式 (2.28) で表現する場合、印刷物のみのデータで得た基底ベクトルを用いる。基底ベクトルを適宜取り替えることにより、式 (2.28) は印刷物以外の物体にも適用できる。 $(X^{(l,N)}, Y^{(l,N)}, Z^{(l,N)})$  は

$$\begin{cases} X^{(1,N)} = s^{(l)} \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y^{(1,N)} = s^{(l)} \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z^{(1,N)} = s^{(l)} \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda) \hat{R}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2.29)$$



で表すことができる。ここで

$$s^{(l)} = \frac{1}{\int_{380}^{780} S^{(l)}(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (2.30)$$

である。\$S^{(l)}(\lambda)\$ は照明 \$l\$ の相対分光スペクトル分布を表し、\$\lambda\$ は波長である。\$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)\$ は等色関数である。本論文では、\$Y^{(l,N)}\$ は \$[0,1]\$ に正規化したものを用いる。重み \$a\_1, a\_2, a\_3\$ を求めるために、式 (2.28) を式 (2.29) に代入して整理すると、

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & X_3^{(1)} \\ Y_1^{(1)} & Y_2^{(1)} & Y_3^{(1)} \\ Z_1^{(1)} & Z_2^{(1)} & Z_3^{(1)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X^{(1,N)} - X_0^{(1)} \\ Y^{(1,N)} - Y_0^{(1)} \\ Z^{(1,N)} - Z_0^{(1)} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

を得る。ここで、

$$\begin{cases} X_k^{(1)} = \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)r_k(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \\ Y_k^{(1)} = \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)r_k(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \\ Z_k^{(1)} = \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)r_k(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (2.32)$$

である。得た \$a\_1, a\_2, a\_3\$ を式 (2.28) に代入すれば、分光反射率 \$\hat{R}(\lambda)\$ を得ることができる。

同じように、推定された分光反射率 \$\hat{R}(\lambda)\$ と照明 2 の相対分光スペクトル分布 \$S^{(2)}(\lambda)\$ を用いて、式 (2.29) と (2.30) により照明 2 下での三刺激値 \$(X^{(1,N)}, Y^{(1,N)}, Z^{(1,N)})\$ を得ることができる。

## 2.9 2色覚での見えのシミュレーション方法

色覚異常者の見えについて、様々なシミュレーションする方法が研究されている [43–50]。その中、色覚異常の見えに対し多くのモデルは片目 2 色覚者の実験に基づいたものである。片目 2 色覚者とは片目が正常色覚を持ち、もう一つの目が 2 色覚を持つ人である。片目 2 色覚者の実験では、観察者の正常色覚を持つ目と 2 色覚を持つ目に同じに見える波長を記録する。その結果、1 型 2 色覚者と 2 型 2 色覚者にとって、波長が 475 nm の刺激が同じ青に見え、波長が 575 nm の刺激が同じ黄色に見えることが Judd により確認された [52]。3 型 2 色覚者に対して、波長が 660 nm である刺激は同じ赤色に見え、485 nm の波長を持つ刺激は同じ青-緑に見えることを Alpern らにより確認された [53]。これらの異常色覚のためのモデルにおいて、代表的なものは Brettel らのモデルである [44]。Viénot らは Brettel らのモデルを簡略化したモデルを提案した [45]。Viénot らのモデルは使いやすいモデルであり、シミュレーション結果は Brettel らのモデルとほぼ同じである。本節では、Viénot のモデルについて述べる。

Viénot らのモデル [45] は 1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚の見えのためのモデルである。Viénot らのモデルでは、1 型 2 色覚と正常色覚間における錐体の反応値の関係式が

$$\begin{pmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

となる。\$L, M, S\$ はそれぞれ L 錐体, M 錐体, S 錐体の反応値である。Viénot らのモデルでは、Smith と Pokorny による XYZ から LMS への変換式 [45, 54]

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

を用いる。式 (2.33) に示されているように、1 型 2 色覚では L 錐体の代わりに M, S 錐体のみが機能していると仮定している。2 型 2 色覚と正常色覚間における錐体の反応値の関係式は

$$\begin{pmatrix} L_D \\ M_D \\ S_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.494207 & 0 & 1.24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

である。式 (2.33)~(2.35) を用いて、正常色覚における三刺激値 \$(X, Y, Z)\$ と 2 色覚における三刺激値 \$(X\_K, Y\_K, Z\_K)\$ の関係式を求めることができる。その関係式は

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3813 & 1.1228 & 0.1730 \\ -0.4691 & 1.3813 & 0.0587 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

及び

$$\begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1884 & 0.6597 & 0.1016 \\ 0.2318 & 0.8116 & -0.0290 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

となる。図 2.16 では、Viénot のモデルによる 2 色覚の見えを示す。正常色覚者に異なって見える色（赤と緑）を K 型色覚者がほとんど区別できないことが分かる。

Judd により求められた混同色中心の座標は、1 型 2 色覚では図 2.17(a) に示す \$(x\_P, y\_P) = (0.747, 0.253)\$ であり、2 型 2 色覚では図 2.17(b) に示す \$(x\_D, y\_D) = (1.000, 0.000)\$ である [55]。

## 2.10 異なる照明下における 2 色覚での色の見えのシミュレーション方法

異なる照明下における 2 色覚者の見えをシミュレーションする手順をを図 2.18 に示す。まず、照明 1 下での正常色覚者における見え画像のある色の三刺激値 \$(R^{(1,N)}, G^{(1,N)}, B^{(1,N)})\$ か

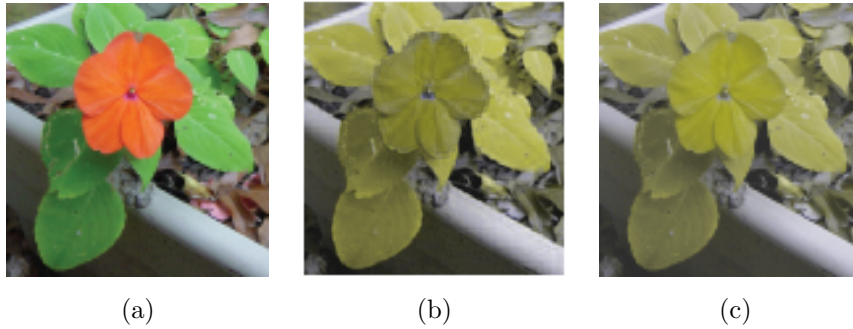


図 2.16 Viénot のモデル [45] による照明  $D_{65}$  下での Flower の画像の見え (a) 正常色覚, (b) P 型色覚, (c) D 型色覚

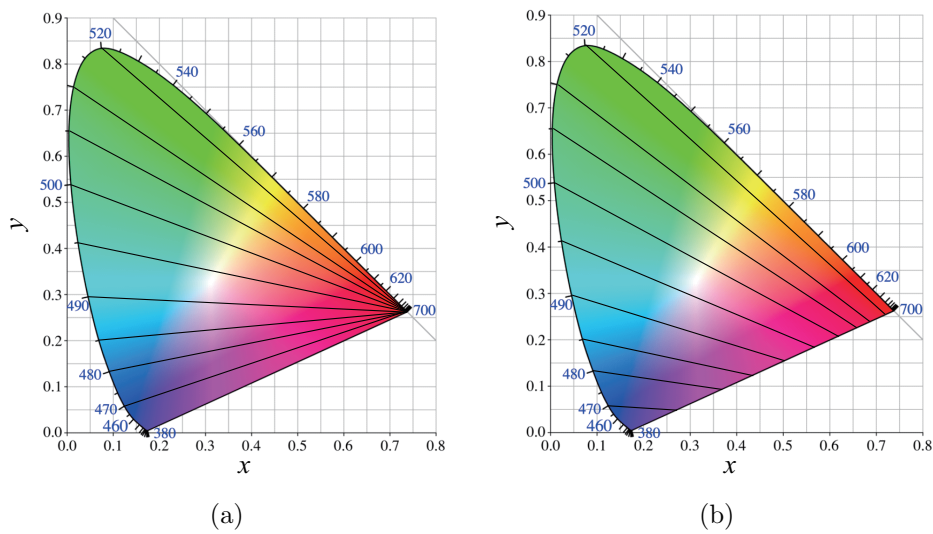


図 2.17  $xy$  色度図における混同色線 (a) 1 型 2 色覚, (b) 2 型 2 色覚

ら  $(X^{(1,N)}, Y^{(1,N)}, Z^{(1,N)})$  を求め,  $(X^{(1,N)}, Y^{(1,N)}, Z^{(1,N)})$  と照明 1 ( $S^{(1)}(\lambda)$ ) を用いて表面反射率  $\hat{R}(\lambda)$  を推定する. 次に, 表面反射率  $\hat{R}(\lambda)$  と照明 2 ( $S^{(2)}(\lambda)$ ) を用いて, 照明 2 での三刺激値  $(X^{(2,N)}, Y^{(2,N)}, Z^{(2,N)})$  を求め, 照明 2 での正常色覚者における見え画像の対応する三刺激値  $(R^{(2,N)}, G^{(2,N)}, B^{(2,N)})$  を求める. そのとき, 三刺激値  $(R^{(2,N)}, G^{(2,N)}, B^{(2,N)})$  がディスプレイの色域を超えてしまうことがあるので, 色域調整を行い, 調整後の三刺激値  $(\tilde{R}^{(2,N)}, \tilde{G}^{(2,N)}, \tilde{B}^{(2,N)})$  を求める. 最後に, 照明 2 での 2 色覚者における見え画像の三刺激値  $(\tilde{R}^{(2,K)}, \tilde{G}^{(2,K)}, \tilde{B}^{(2,K)})$  を求める.

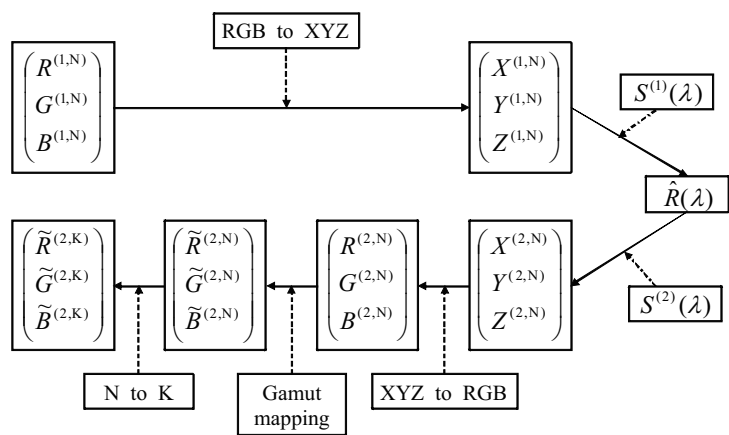


図 2.18 カラーコンスタンシー理論による異なる照明下で 2 色覚者の見え画像における三刺激値の推定



## 第 3 章

# 提案手法

2色覚者は特定の色の組み合わせを判別できず、生活の中で不便を感じることもある。この問題を解決するために、近年、色覚バリアフリーを目的とした研究がなされている [1–28]。その中に、配色パターンに着目した手法 [1–23] や光源スペクトルに着目した手法 [24–28] がある。配色パターンに着目した手法の色変換能力はディスプレイに依存するが、光源スペクトルに着目した手法はディスプレイより幅広い色を2色覚者に見せることが可能である。先行の光源スペクトルに着目した手法では、ある特定の照明により特定の物体の見えを改善する [25,27]。しかし、物体の色の組み合わせが異なると、最適な照明も異なる。2色覚者に対し、物体ごとに最適な照明を求める研究はまだなされていない。

まず、照明が適切か否かを判定するために、適合度関数  $F^{(K)}$  を構成する。図 3.1 に示すように、照明 1 下での正常色覚者における見え画像と照明 2 下での2色覚者 (K 型色覚者) における見え画像が同程度のコントラストに感じることが目標である。ヒトの感じるコントラストを適合度関数に適切に反映させ、適合度が高いとき、照明 2 が良いコントラストを与えていると考える。次に、適合度関数の値が最良となる照明 (最適照明) の分光スペクトル分布を求める。

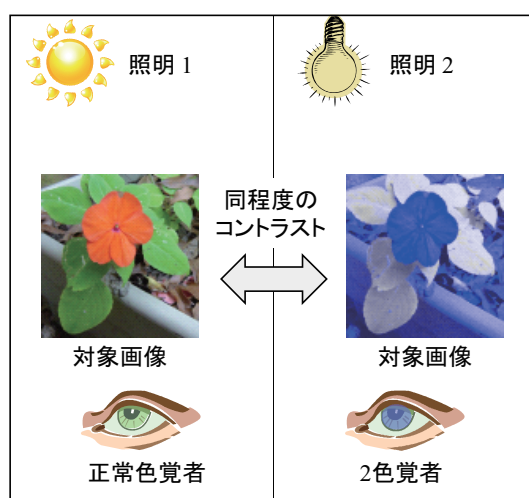


図 3.1 照明変換による2色覚のための視認性の改善

### 3.1 局所コントラスト

提案手法において、局所コントラストは画像の局所領域範囲における画素値の分散により計算される。分散は画素値の小さな変動に対して頑健であるので、コントラストを評価するために適している。局所コントラストが高い場合、局所領域内における画素値の分散が大きくなり、平坦部においては分散の値が小さくなる。局所領域  $Q_i$  については様々な形状が考えられるが、本論文では、図 3.2 で示すように、注目画素  $i$  からのチェス盤距離 [29] が  $\rho$  以下である画素を含む近傍範囲  $Q_i$  を局所領域として考える。図 3.2 の太線で表示する範囲は  $\rho = 2$  のときの  $Q_i$  の範囲である。局所コントラスト  $v_i$  は画素  $i$  と混同する色を持つ画素と画素  $i$  と似た色を持つ画素を用いて計算する。図 3.2 において、局所分散を計算する際、画素  $i, j_1, j_2, j_3$  を用いる。画素  $j_4$  と  $j_5$  は互いに混同色であるが、注目画素  $i$  の局所分散を計算する際には  $j_4$  と  $j_5$  は考慮しない。なぜならば、画素  $j_4$  と  $j_5$  は画素  $i$  の混同色ではなく、似た色でもないからである。画素  $j_4$  と  $j_5$  は  $v_{j_4}$  あるいは  $v_{j_5}$  の計算に用いられる。 $Q_i$  においては、赤、オレンジ、緑色間において良いコントラストをもたらす照明 2 が良い照明である。適合度関数においては、全ての局所領域が考慮される。図 3.3 は正常色覚と 2 色覚に対する色の差の評価手順を示す。

### 3.2 適合度関数

まず、K 型色覚に対して、画素  $j$  の色が画素  $i$  の色と混同色あるいは似た色か否かを表したラベル  $h_{i,j}$  を

$$h_{i,j}^{(K)} = \begin{cases} 1 & (\Delta E_{ij}^{(1,N)} > \alpha \text{ and } \Delta E_{ij}^{(1,K)} < \beta) \text{ or } (E_{ij}^{(1,N)} < \gamma), \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.1)$$

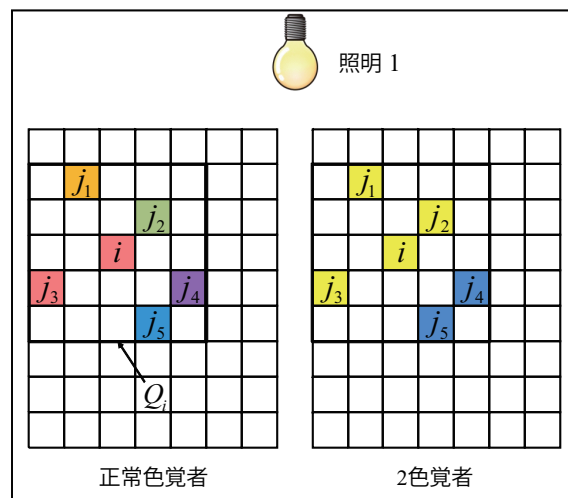


図 3.2 画素  $i$  に関する混同色画素

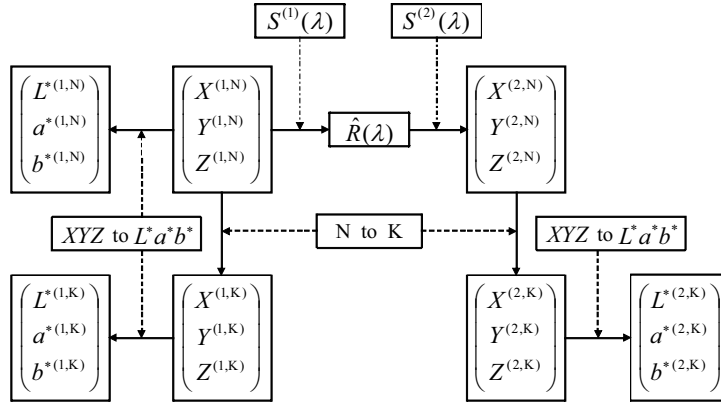


図 3.3 正常色覚と 2 色覚に対する色の差の評価手順

で定義する．ここで， $\Delta E_{ij}^{(1,N)}$  は，照明 1 での N 型色覚者の見え画像における画素  $i$  と  $j$  の色差である．色差  $\Delta E_{ij}$  は，

$$\Delta E_{ij} = \sqrt{(L_i^* - L_j^*)^2 + (a_i^* - a_j^*)^2 + (b_i^* - b_j^*)^2} \quad (3.2)$$

で得られる．ここで， $L^*$ ， $a^*$ ， $b^*$  は  $L^*a^*b^*$  色空間における値である．式 (3.1) において， $\alpha$ ， $\beta$  は画素  $i$  と  $j$  が K 型色覚者に対し混同色か否かを判定するためのパラメータであり，正の実数である． $\alpha$  と  $\beta$  はそれぞれ，正常色覚者と 2 色覚者が感じる色差である．提案手法において，その条件を満たす色対は正常色覚者にとって異なる色 ( $\Delta E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$ ) に見え，かつ 2 色覚者にとって似た色 ( $\Delta E_{ij}^{(1,K)} < \beta$ ) に見える混同色対である． $\gamma$  は画素  $j$  が画素  $i$  と似た色か否かを判定するパラメータであり，正の実数である．K 型色覚に対して， $h_{i,j}^{(K)}$  が 1 の場合，画素  $i$  を中心とした近傍範囲における局所分散を計算する際に，画素  $j$  は考慮されるという意味である．

また， $h_{i,j}^{(K)}$  を用いて画素の集合  $V_i^{(K)}$  を

$$V_i^{(K)} = \{j | j \in Q_i \text{ and } h_{i,j}^{(K)} = 1\} \quad (3.3)$$

で定義する．図 3.2 において，画素  $i$ ， $j_1$ ， $j_2$ ， $j_3$  は  $V_i^{(K)}$  の要素である．画素  $j_1$  と  $j_2$  の色は条件  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$  かつ  $\Delta E_{ij}^{(1,K)} < \beta$  を満たす．画素  $j_3$  の色は条件  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$  を満たす．画素  $i$  の色は  $\Delta E_{ii}^{(1,N)} = 0$  であるので，常に条件  $\Delta E_{ii}^{(1,N)} < \gamma$  を満たす．画素  $j_4$  と  $j_5$  は  $V_i^{(K)}$  の要素ではない．なぜならば，K 型色覚と N 型色覚のどちらにとっても，これらの画素の色は画素  $i$  の色と異なる色であるからである．すなわち，条件  $\Delta E_{ij}^{(1,K)} < \beta$  と  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$  を満たしていない． $V_i^{(K)}$  の要素数を  $|V_i^{(K)}|$  で表す．図 3.2 の明示したのみについて考えた場合， $|V_i^{(K)}| = 4$  である．

続いて，局所領域内における混同色の画素値の分散を定義する．提案手法では，画素  $i$  の局所領域における画素値の分散  $v_i^{(l,N)}$  を

$$v_i^{(l,N)} = \frac{1}{|V_i^{(K)}|} \sum_{j \in V_i^{(K)}} \left[ \left( L_j^{*(l,N)} - \langle L_i^{*(l,N)} \rangle \right)^2 + \left( a_j^{*(l,N)} - \langle a_i^{*(l,N)} \rangle \right)^2 + \left( b_j^{*(l,N)} - \langle b_i^{*(l,N)} \rangle \right)^2 \right] \quad (3.4)$$



で定義する．ここで， $\langle L_i^{*(l,N)} \rangle$  は  $j \in V_i^{(K)}$  である  $L_j^{*(l,N)}$  の平均値であり， $\langle a_i^{*(l,N)} \rangle$ ， $\langle b_i^{*(l,N)} \rangle$  についても同様である． $v_i^{(l,K)}$  も同様にして定義する．

最後に，適合度関数を定義する．K 型色覚に対して，適合度関数  $F_1^{(K)}$  をまず

$$F_1^{(K)} = \frac{\sum_{i \in U^{(K)}} \left( v_i^{(1,N)} - \langle v^{(1,N)} \rangle \right) \left( v_i^{(2,K)} - \langle v^{(2,K)} \rangle \right)}{\sqrt{\sum_{i \in U^{(K)}} \left( v_i^{(1,N)} - \langle v^{(1,N)} \rangle \right)^2} \sqrt{\sum_{i \in U^{(K)}} \left( v_i^{(2,K)} - \langle v^{(2,K)} \rangle \right)^2}} \quad (3.5)$$

で定義する．ここで， $U^{(K)}$  は  $v_i^{(1,N)}$  が  $\delta$  より大きい画素  $i$  の集合である． $\langle v^{(1,N)} \rangle$  と  $\langle v^{(2,K)} \rangle$  はそれぞれ  $i \in U^{(K)}$  である  $v_i^{(1,N)}$  と  $v_i^{(2,K)}$  の平均である． $F_1^{(K)}$  は照明 1 での正常色覚における局所分散と照明 2 での 2 色覚における局所分散の間の相関係数である． $F_1^{(K)}$  が 1 に近いほど，照明 1 での正常色覚者が感じるコントラストと照明 2 での K 型色覚者にとってのコントラストの相関が強いとみなすことができる． $\delta$  は  $F^{(K)}$  の計算において平坦部を除くために導入したパラメータであり，正の実数である．図 3.5 では平坦部の例を示す．この場合， $Q_i$  におけるすべての画素は常に条件  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$  を満たし，常に  $V_i^{(K)}$  に属する．しかし，平坦部は適合度関数  $F^{(K)}$  の最適化において悪影響与える可能性があるため， $F^{(K)}$  の計算から除去する必要がある． $\delta$  は平坦部を除く役割を持つ．図 3.6 では，各パラメータにより考慮される範囲を示す．

また，K 型色覚に対して，適合度関数  $F_2^{(K)}$  を

$$F_2^{(K)} = \frac{\sum_{i \in U^{(K)}} \left( v_i^{(1,N)} - \langle v^{(1,N)} \rangle \right) \left( v_i^{(2,K)} - \langle v^{(2,K)} \rangle \right)}{\sum_{i \in U^{(K)}} \left( v_i^{(1,N)} - \langle v^{(1,N)} \rangle \right)^2} \quad (3.6)$$

で定義する． $F_2^{(K)}$  は相関係数を少し変えたものである． $F_2^{(K)}$  が 1 に近いほど，照明 2 が K 型色覚者にとって照明 1 正常色覚者と同程度のコントラストをもたらすとみなすことができる．図 3.4 に示すように，局所分散  $v^{(2,K)}$  が小さい値の場合でも， $v^{(2,N)}$  の変化を反映しているならば  $F_1^{(K)}$  は高い値を持つことになる．すなわち，相関係数は照明 1 での正常色覚者と照明 2 での K 型色覚者が感じるコントラストの相関性を表し，照明 2 での K 型色覚者にとってのコントラストを保障することはできない．それに対し，適合度関数  $F_2^{(K)}$  は照明 2 下での K 型色覚者にとって，照明 1 での正常色覚者と同程度のコントラストを感じることを保障でき，理想な状況を達成できると考えられる．

### 3.3 提案手法におけるパラメータの役割

パラメータ  $\alpha$  は照明 1 下での正常色覚者の見え画像における色差が大きい画素を考えるためのものである．図 3.6(a) で示す青色の部分はパラメータ  $\alpha$  により考慮される範囲を示す．パラメータ  $\beta$  は照明 2 下での 2 色覚者の見え画像における色差が小さい画素を考えるためのものである．

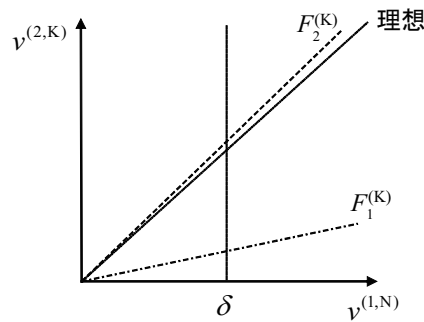


図 3.4 適合度関数  $F^{(K)}$  と相関係数

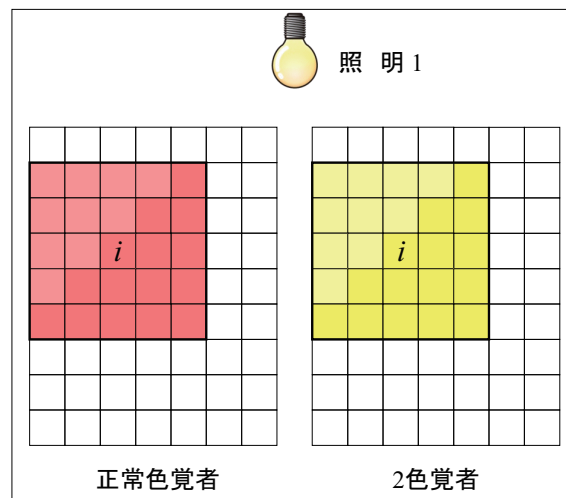


図 3.5 平坦部の例

図 3.6(b) で示す緑色の部分はパラメータ  $\beta$  により考慮される範囲を示す．パラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  により，2色覚者にとっての混同色画素を考えることができる．図 3.6(c) で示すオレンジ色の部分はパラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  により考慮される範囲を示す．

パラメータ  $\gamma$  は照明 1 下での正常色覚者の見え画像における色差が小さい画素を考えるためのものである．図 3.6(d) で示す黄色の部分はパラメータ  $\gamma$  により考慮される範囲を示す．パラメータ  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  により考慮される範囲を図 3.6(e) に示す．しかし，パラメータ  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  のみの場合は，照明 1 での正常色覚者の見え画像における平坦部も考慮してしまう．平坦部を除くために，パラメータ  $\delta$  を導入する．パラメータ  $\delta$  は照明 1 での正常色覚者の見え画像における局所分散が小さい画素を除く効果がある． $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ ， $\delta$  の四つのパラメータにより，画像における混同色を適切に考慮することができる．

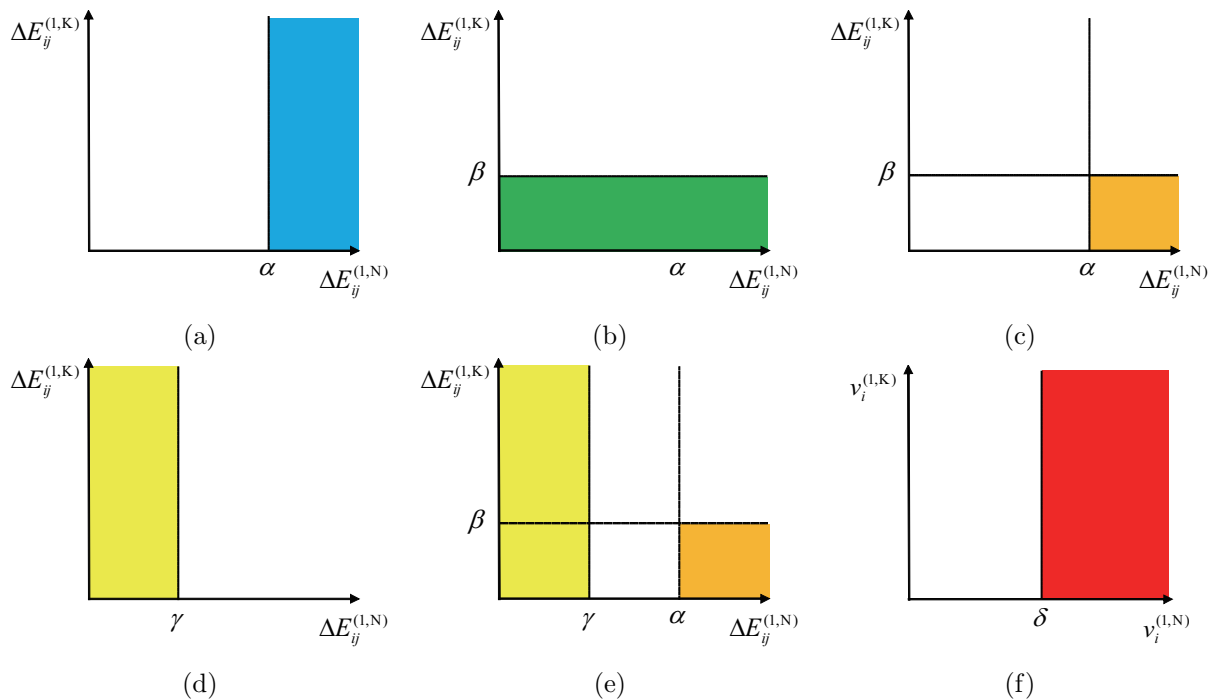


図 3.6 パラメータにより考慮される範囲 (a)  $E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$ , (b)  $E_{ij}^{(1,K)} < \beta$ , (c)  $E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$  かつ  $E_{ij}^{(1,K)} < \beta$ , (d)  $E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$ , (e)  $(E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$  かつ  $E_{ij}^{(1,K)} < \beta)$  or  $E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$ , (f)  $v_i^{(1,N)} > \delta$

### 3.4 最適化

最適照明を得るためには、設計した適合度関数を最適化する必要がある。しかし、この適合度関数は解析的な最適化ができない。また、可能な光源スペクトルを総当りに調べるとしても、その計算量は莫大なものとなる。考える光源スペクトルを離散化・量子化し、例えば 380 nm, 385 nm, ..., 780 nm の 81 種類の波長について 0, 20, ..., 200 の 11 段階の強度をとりうると考えるにしても、 $11^{81} \approx 2.25 \times 10^{84}$  種類の光源が考えられ、最適スペクトルの計算量は莫大なものとなる。適合度関数を最適化する際、近似解探索手法を用いることにより（準）最適スペクトルを求める必要がある。数値的解法として、例えば遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm : GA) [56] がある。

## 第 4 章

# 最適化アルゴリズム

本章では、最適化アルゴリズムについて述べる。まず、第 3 章の適合度関数の最適化に使用する GA について述べる。次に、EM アルゴリズム [57] について述べる。

### 4.1 遺伝的アルゴリズム (GA)

GA は、生物の進化を模倣した学習的アルゴリズムである [56]。自然界においては、ある世代における個体の集合の内、環境に適した個体（適合度が高い個体）が次の世代に残る確率が高い。また、交叉と突然変異によって遺伝子の多様性を保っている。

GA を適用できる問題の範囲は非常に広い。図 4.1 に示すように、GA の一般的な手順は以下の通りである。

1. 初期化：ランダムな染色体を持つ個体を  $N$  個生成し、初期世代を設定する。
2. 選択：各個体の適合度を計算し、適合度に依存したある規則により個体を選択し、次の世代に残す。選択の際は、適合度が高い個体は次の世代に残される確率が高く、適合度が低い個体は次の世代に残る確率が低くなるようにする。
3. 交叉：設定された確率・方法にしたがって交叉を行い、新しい個体を生成する。
4. 突然変異：設定された確率・方法にしたがって突然変異を行い、新しい個体を生成する。
5. 終了判定：終了条件を満たせば、そのときに得られている最良な個体を問題の準最適解とする。そうでなければ手順 2 へ戻る。

#### 4.1.1 遺伝子の表現

GA において、個体（遺伝子）を表す文字列として用いるものは任意であるが、一般的には 0 と 1 の 2 値を用いることが多い。0 または 1 によりコード化された情報で遺伝子を表す。遺伝子の長さは固定するのが一般的であるが、可変長にして、世代交代が進むにつれて遺伝子を複雑化させ、長くなるように設定する方法もある [56]。本論文では、遺伝子の長さを固定なものとし、GA について述べる。

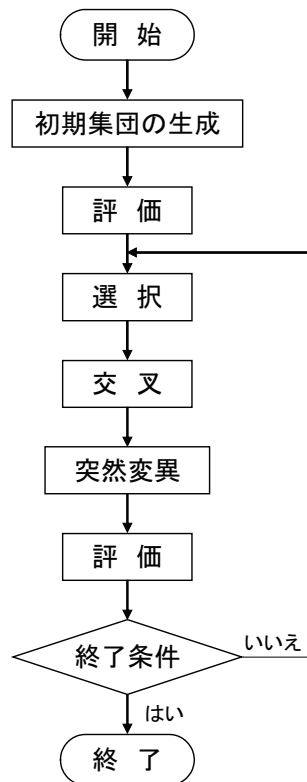


図 4.1 GA の基本的動作の流れ図

#### 4.1.2 適合度

自然界においては、環境に対する適合度が高い個体が生き残り、増殖する。逆に、適合度が低い個体は淘汰されることになる。GA における最適化問題において、目的関数を最小化あるいは最大化する問題がある。どちらの問題にしても、環境に適した個体を次の世代に残すように操作を行う。

#### 4.1.3 スケーリング

適合度関数による評価値をそのまま使っても良いが、GA をより効率的に働かせるために、ある関数を導入し、適合度の差異を適切に拡大あるいは縮小することがある。すなわち、適合度のスケールリングである。適合度のスケールリングにおいて、線形スケールリング、シグマ切断、べき乗スケールリングなどがある。線形スケールリングは、適合度を線形変換するものである。シグマ切断は、個体群において多くの個体が高い適合度を持ち、残りのわずかな個体が低い適合度を持つ場合、適合度の標準偏差により低い適合度の個体を切断するものである。べき乗スケールリングとは、適合度をべき乗することにより変化させるものである。

#### 4.1.4 遺伝的操作

GA における遺伝的操作には選択，交叉，突然変異などがある．以下にこれらの操作について述べる．

GA における選択とは，適合度が高い個体が多くの子孫を持つようにし，適合度が低い個体を淘汰することである．選択において，主にルーレット選択，期待値選択，トーナメント選択，エリート保存選択などがある．ルーレット選択は，各個体の適合度が全ての個体における適合度の総和に占める割合を選択の確率とするものである．期待値選択は，適合度を用いて期待値を決め，期待値と期待値の総和との割合により選択する方法である．ルーレット選択と期待値選択は適合度に基づくことに対し，ランキング選択は適合度の大きなものから順に選択する個体数をあらかじめ決めておくものである．トーナメント選択は個体群から決められた数の個体をランダムに選択し，その中で最も適合度が高い個体を次の世代に残し，この手続きを次の世帯の数になるまで繰り返すものである．エリート選択は，個体群の中から最も適合度が高い個体をそのまま次の世代に残すものである．場合により，複数の個体を残すこともある．

交叉とは，選択された二つの個体から遺伝子の組み換えにより新しい個体を作ることである．交叉には1点交叉，多点交叉，一様交叉などがある．図 4.2(a) で示すように，1点交叉は，親 1，親 2 の遺伝子においてランダムに 1 箇所を選んで交叉し，新しい子 1，子 2 を作ることである．図 4.2(b) で示すように，多点交叉は，親 1，親 2 の遺伝子においてランダムに交叉点を複数選んで交叉し，新しい子 1，子 2 を作ることである．図 4.2(c) で示すように，一様交叉では，まずランダムにマスクを作り，親 1，親 2 の遺伝子において，マスクが × の点について交叉し，子 1，子 2 を作る．

交叉だけでも遺伝子の多様性が生じるが，突然変異により多様性を更に豊かなものにすることができる．図 4.3(a) に示すように，突然変異では，染色体上にある遺伝子座の値を他の値に置き換える．図 4.3(b) に示すように，逆位は個体上のランダムに選んだ 2 点間の部分の順序を反転する操作である．このほかに，転座，重複，挿入，欠失などがある．図 4.3(c) に示すように，転座は染色体の一部が同じ染色体の他のところに位置を変えることである．図 4.3(d) に示すように，重複では，染色体上にある長さのコードを重複させる．挿入では，染色体上にある長さの遺伝子を挿入し，その結果，染色体の長さが長くなる．欠失では，染色体上のある長さの部分文字列が失われ，染色体の長さが短くなる．

実際に GA を使う際には，最適化問題に応じた設定をする必要がある．

## 4.2 EM アルゴリズム

EM アルゴリズムは，与えられたデータに対し，潜在変数を求める場合に用いられる．E は expectation を意味し，M は maximization を意味する．適用例として，与えられたデータが混合正規分布 [57] に従う場合，混合正規分布の未知パラメータ（潜在変数）を推定する問題などがある．

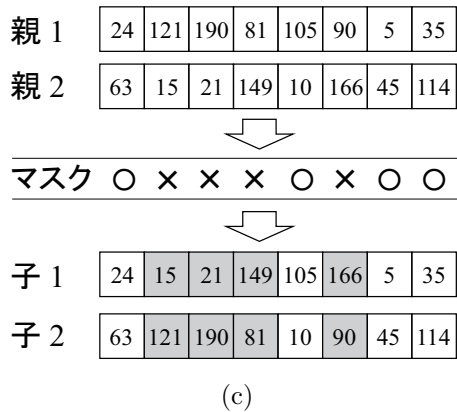
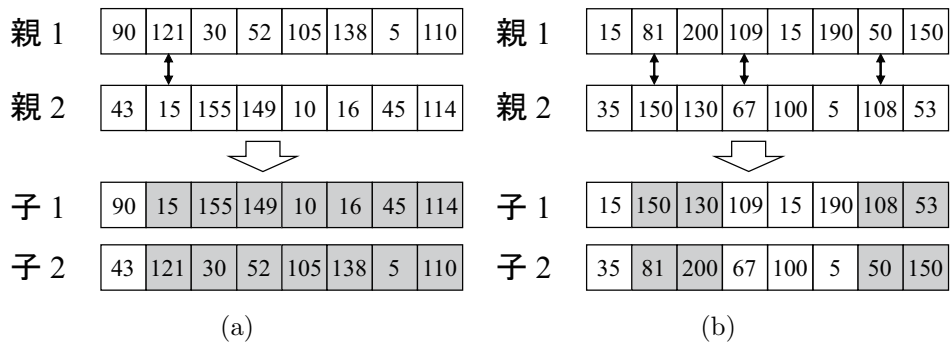


図 4.2 交叉 (a) 1 点交叉, (b) 多点交叉, (c) 一様交叉

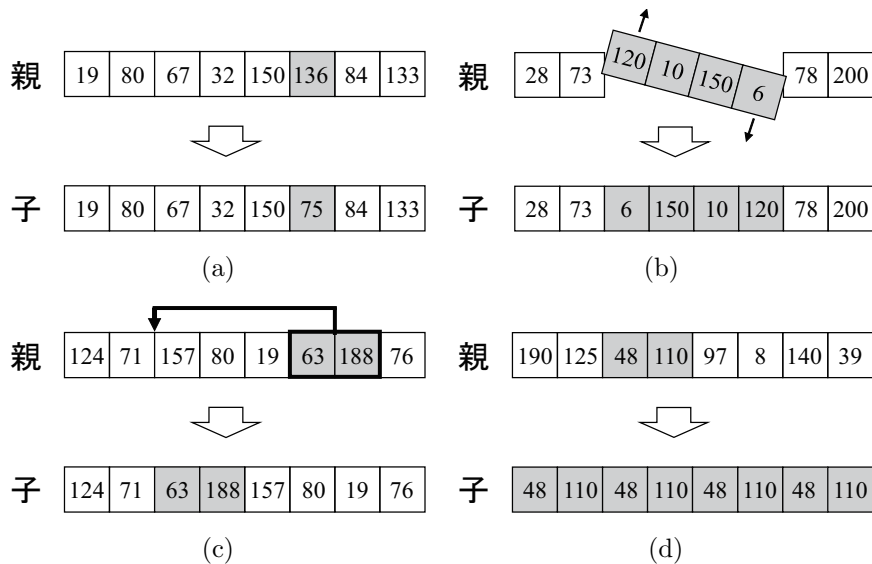


図 4.3 突然変異 (a) 突然変異, (b) 逆位, (c) 転座, (d) 重複

#### 4.2.1 混合正規分布

混合正規分布は複数の正規分布からなる。ここで、照明を例にし、照明の相対分光スペクトル分布が混合正規分布に従っていると仮定し、混合正規分布について説明する。一般的な混合正規分

布は,

$$G(\lambda) = \sum_{i=1}^m \xi_i g_i(\lambda), \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^m \xi_i = 1, \quad (4.2)$$

$$\int_{380}^{780} g_i(\lambda) d\lambda = 1 \quad (4.3)$$

で定義する. ここで,  $G(\lambda)$  は混合正規分布であり,  $\xi_i$  は  $i$  番目の正規分布の混合比率である.  $m$  は混合数である.  $g_i(\lambda)$  は正規分布であり,

$$g_i(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi c_i^2}} \exp\left[-\frac{(\lambda - b_i)^2}{2c_i^2}\right] \quad (4.4)$$

で定義する. 混合正規分布において,  $\xi_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  が未知パラメータである.

#### 4.2.2 最尤法

本論文における問題設定では, 照明の分光スペクトル分布が与えられたデータであり, 混合正規分布が求める確率分布である. 最尤法 [57] は, 与えられたデータからそれが従う確率分布の母数 (未知パラメータ) について推定するためによく用いられる方法であり, 尤度の概念を利用するものである. 与えられたデータ (照明) に対して,  $H$  を総密度,  $h(\lambda)$  を相対密度とすると, 密度  $h^*(\lambda)$  は,

$$h^*(\lambda) = Hh(\lambda), \quad (4.5)$$

$$\int_{380}^{780} h(\lambda) d\lambda = 1 \quad (4.6)$$

となる. したがって, 混合正規分布の対数尤度  $Y$  は,

$$Y = \int_{380}^{780} h(\lambda) \log G(\lambda) d\lambda \quad (4.7)$$

となる.  $Y$  は常に負の値を持つ.  $Y$  が最大となるパラメータが良いパラメータである. 最適なパラメータは反復法により求める. 尤度により確率分布 (混合正規分布) と与えられたデータ (照明) がどの程度似ているか否かを判定できる. 尤度が高いほど確率分布が与えられたデータと似ているということである.

#### 4.2.3 EM アルゴリズムの手順

EM アルゴリズムの一般的な手順を以下に述べる.



1. 0 回目のパラメータ  $\xi_i^{(0)}$ ,  $b_i^{(0)}$ ,  $c_i^{(0)}$  の値を設定する.
2. E ステップ: 与えられたデータにおける密度関数  $h(x)$  を基に  $t$  回目の確率分布における尤度の期待値  $z_i^{(t)}(\lambda)$  を求める. 期待値  $z_i^{(t)}(\lambda)$  は,

$$z_i^{(t)}(\lambda) = \frac{h(\lambda)\xi_i^{(t)}g_i^{(t)}(\lambda)}{G^{(t)}(\lambda)} \quad (4.8)$$

で得る.

3. M ステップ: 得られた尤度の期待値を最大化するようなパラメータを求める.
4. 以上のような計算によって得られたパラメータを  $(t+1)$  回目のパラメータとし, E ステップと M ステップの計算を繰り返す. 混合正規分布における  $(t+1)$  回目のパラメータは,

$$\xi_i^{(t+1)} = \int_{380}^{780} z_i^{(t)}(\lambda) d\lambda, \quad (4.9)$$

$$b_i^{(t+1)} = \frac{\int_{380}^{780} z_i^{(t)}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{380}^{780} z_i^{(t)}(\lambda) d\lambda}, \quad (4.10)$$

$$(c_i^2)^{(t+1)} = \frac{\int_{380}^{780} z_i^{(t)}(\lambda) (\lambda - b_i^{(t+1)})^2 d\lambda}{\int_{380}^{780} z_i^{(t)}(\lambda) d\lambda} \quad (4.11)$$

で得る.

EM アルゴリズムの反復過程において, 対数尤度は常に増加することが証明されている. したがって, 対数尤度の上限値が存在すれば, EM アルゴリズムは対数尤度の極大値に収束する.

## 第 5 章

# 実験

提案手法により求めた最適照明 2 が 2 色覚者の見えを改善しているか否かを確認するために、数枚の画像によるシミュレーション実験を行った。実験では、図 2.16(a) の Flower, 図 5.1(a) の Chart, 図 5.1(b) の Metro, 図 5.1(c) の Nandin の 4 枚の画像を用いた。これらの画像は、2 色覚者が混同する色の組み合わせを含む画像である。本実験では、対象物体を印刷物とする。対象印刷物を sRGB のデジタル画像として記録し、画像ごとに 2 色覚者に最適な照明を求める。式 (2.28) の基底ベクトル  $r_0 \sim r_3$  には、印刷物用のものを用いた。

### 5.1 適合度関数のパラメータ設定

提案手法の適合度関数には、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\rho$  の五つのパラメータがある。本論文では、 $\alpha = 15$ ,  $\beta = 5$ ,  $\gamma = 5$ ,  $\delta = 25$ ,  $\rho = 10$  とした。これらのパラメータの設定方法について以下に述べる。

図 5.2(a) における緑, マゼンタ, 青, 赤, 黄色は P 型色覚に対する注目画素  $i$  の集合を表す。図 5.2(b)~(f) では、画素  $j$  の色が条件  $\Delta E_{ij}^{(1,P)} < \beta$  を満たせば白で表示し、そうでなければ黒で表示している。図 5.2(b)~(f) に示すように、 $\beta$  が 5 以上の場合、多くの似た色は白で表示されていることが分かる。そして、“26” という数字も判別しにくくなっていることが分かる。 $\beta$  の値を大きくすることにしがって、混同しない色も条件  $\Delta E_{ij}^{(1,P)} < \beta$  を満たすことになるので、 $\beta$  の設定としてはできるだけ小さい値が良い。 $\beta$  の値を小さくしすぎると、条件  $\Delta E_{ij}^{(1,P)} < \beta$  を満たす色の数が減り、図 5.2(b), (c) のようになってしまう。その原因は、ヒトが見て同じに見える色対でも、画素値としては若干の差があるからである。図 5.3 でも、同じような結果が得られた。これらの観察結果に基づき、本論文では  $\beta = 5$  とした。

正常色覚者が判別できる色対を表現するために、 $\alpha$  は大きい値に設定する必要がある。しかし、 $\alpha$  を大きくしすぎると、条件  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} > \alpha$  を満たす色がなくなる。本論文では  $\alpha = 15$  とした。

$\gamma$  は照明 1 下での正常色覚者に対し似た色か否かを判定するパラメータである。図 5.4 に示すように、 $\gamma$  が 5 以上の場合、似た色の多くは白で表示されていることが分かる。似た色という意味で  $\gamma$  をできるだけ小さい値にすると良いので、本論文では  $\gamma = 5$  とした。

$\delta$  は平坦部 (の分散) を判定するためのパラメータである。 $\gamma$  は似た色を定義するので、 $\delta = \gamma^2$

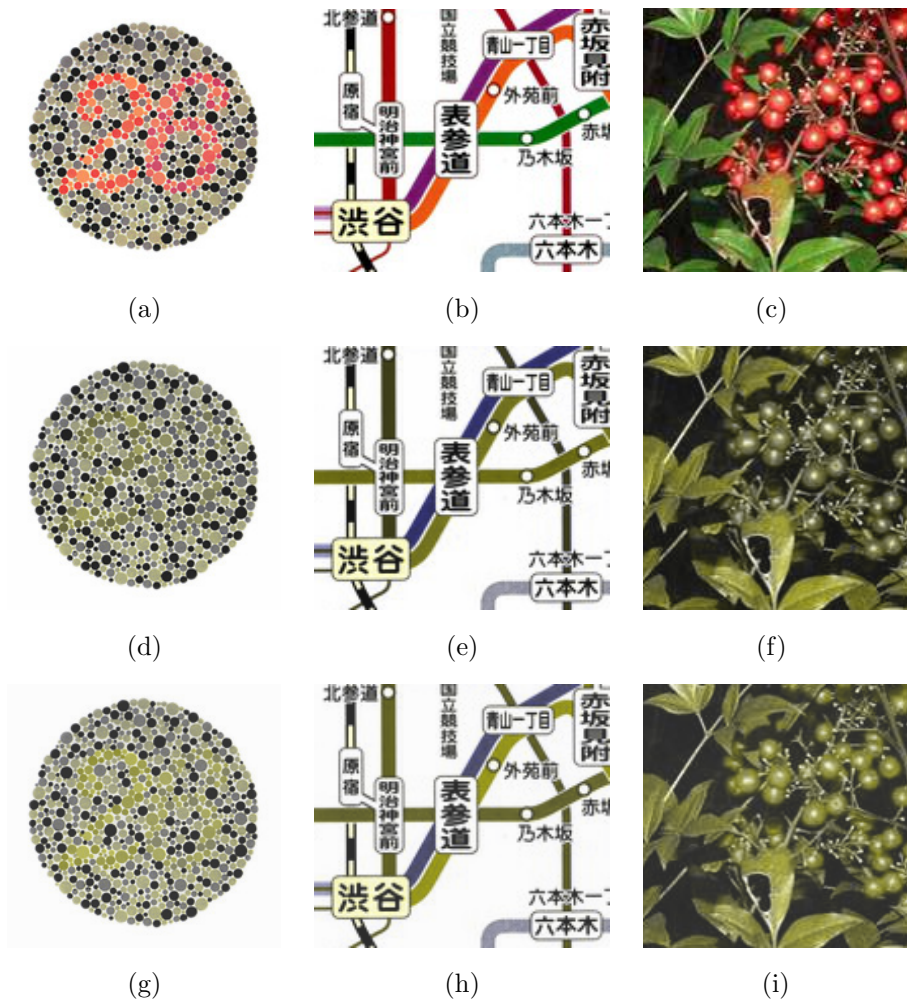


図 5.1 D<sub>65</sub> 光源での見え. 正常色覚 (a) Chart, (b) Metro, (c) Nandin ; P 型色覚 (d) Chart, (e) Metro, (f) Nandin ; D 型色覚 (g) Chart, (h) Metro, (i) Nandin

とした.

## 5.2 色域調整

求めた最適照明 2 下での色の見えがディスプレイの色再現域を超えてしまうことがある. 照明 2 下での色の見えにおけるシミュレーション結果を sRGB ディスプレイで観察するために, 色分布を sRGB ディスプレイの表示範囲内に収める色域調整が必要である. 本論文では, 色域調整後の RGB 値 ( $\tilde{R}^{(2,N)}, \tilde{G}^{(2,N)}, \tilde{B}^{(2,N)}$ ) を

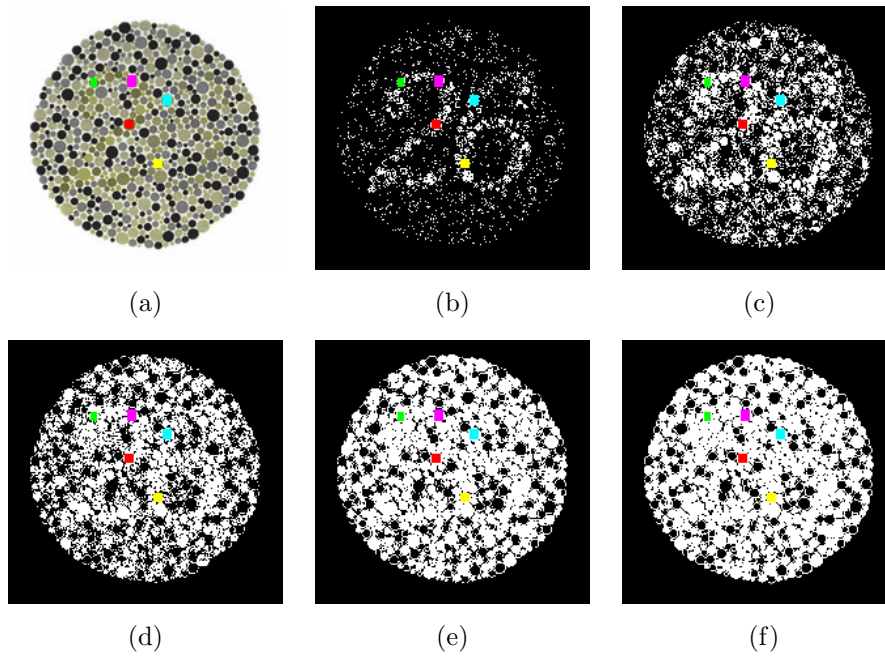


図 5.2 P 型色覚に対する条件  $\Delta E_{ij}^{(1,P)} < \beta$  を満たす画素  $j$  の集合 (a) Chart における注目画素  $i$  の集合 (緑, マゼンタ, 青, 赤, 黄色), (b)  $\beta = 1$ , (c)  $\beta = 3$ , (d)  $\beta = 5$ , (e)  $\beta = 7$ , (f)  $\beta = 9$

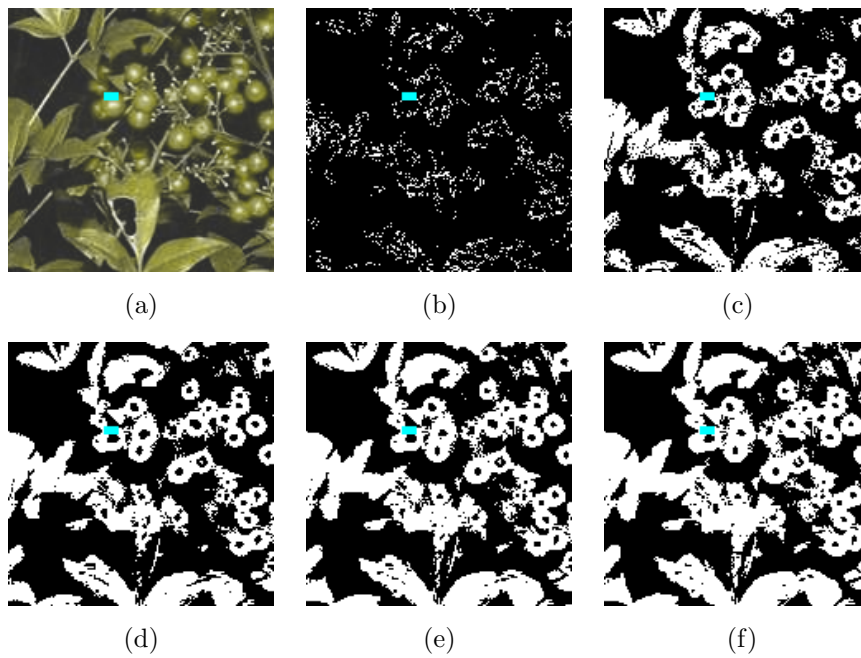


図 5.3 D 型色覚に対する条件  $\Delta E_{ij}^{(1,D)} < \beta$  を満たす画素  $j$  の集合 (a) Nandin における注目画素  $i$  の集合 (青), (b)  $\beta = 1$ , (c)  $\beta = 3$ , (d)  $\beta = 5$ , (e)  $\beta = 7$ , (f)  $\beta = 9$

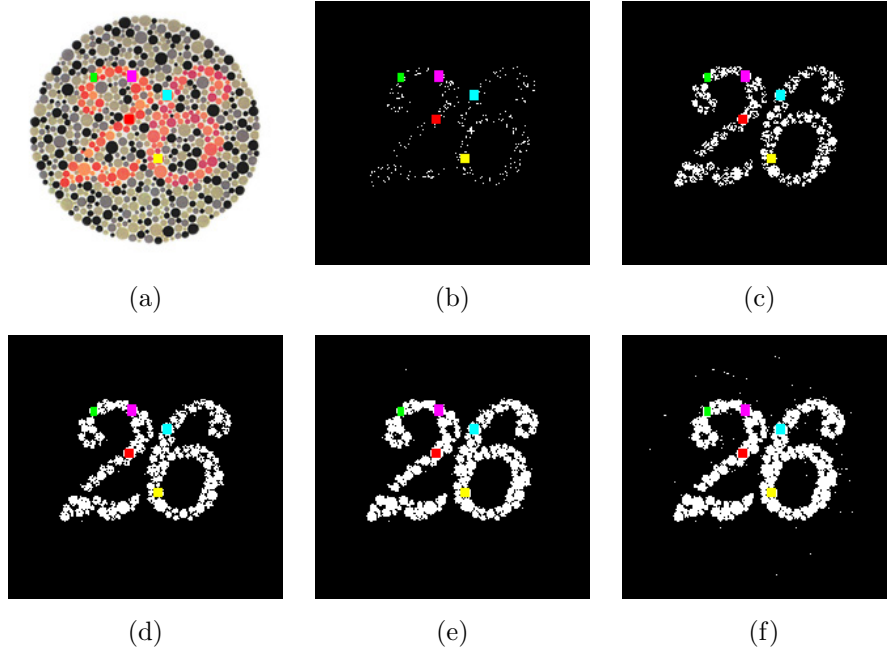


図 5.4 正常色覚に対する条件  $\Delta E_{ij}^{(1,N)} < \gamma$  を満たす画素  $j$  の集合 (a) Chart における注目画素  $i$  の集合 (緑, マゼンタ, 青, 赤, 黄色), (b)  $\gamma = 1$ , (c)  $\gamma = 3$ , (d)  $\gamma = 5$ , (e)  $\gamma = 7$ , (f)  $\gamma = 9$

$$\begin{cases} \tilde{R}^{(2,N)} = \frac{R^{(2,N)} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \\ \tilde{G}^{(2,N)} = \frac{G^{(2,N)} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \\ \tilde{B}^{(2,N)} = \frac{B^{(2,N)} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \end{cases} \quad (5.1)$$

で得る. ここで,  $C_{\max}$  と  $C_{\min}$  はそれぞれ対象画像における  $(R^{(2,N)}, G^{(2,N)}, B^{(2,N)})$  の最大値と最小値を表す. 本実験においては,  $(\tilde{R}^{(2,N)}, \tilde{G}^{(2,N)}, \tilde{B}^{(2,N)})$  を照明 2 下での三刺激値とする. 2 色覚のための三刺激値は  $(\tilde{R}^{(2,N)}, \tilde{G}^{(2,N)}, \tilde{B}^{(2,N)})$  を Viénot らのモデルに適用することにより得られる. このような色域調整により, 照明 2 下での 2 色覚者における見えのシミュレーション結果を sRGB ディスプレイにより観察することができる.

各画像に対する色域調整の程度を表示するために, 各画像の圧縮率を定義する. 圧縮率  $C$  を

$$C = \frac{1}{C_{\max} - C_{\min}}. \quad (5.2)$$

で定義する.  $C$  の値が小さいほど, 元画像に対する圧縮が大きいことを表す.

## 5.3 GAによる最適化

提案手法における適合度関数（式 (3.5), (3.6)）は解析的な最適化ができない。ここでは、最適光源スペクトルを求めるために GA を用いる。

提案適合度関数に関連する GA 関連用語の定義を以下に示す。

1. 染色体：光源
2. 遺伝子：相対分光エネルギー強度
3. 遺伝子座：波長
4. 遺伝子型：分光スペクトル強度の配列
5. 遺伝子長：81
6. 個体：染色体で特徴付けられた個々
7. 集団：個体の集まり
8. 集団のサイズ：集団内の個体数
9. 世代：遺伝的操作の前または後の集団

### 5.3.1 パラメータ設定

提案手法に関する GA においては、初期集団、集団のサイズ、選択数、交叉確率、突然変異確率、終了条件（適合度のしきい値  $\tau$ ）の 6 種類のパラメータがある。初期集団は 4 種類の照明からなり、集団のサイズ（個体数）は 200 とした。1 種類目の照明は、図 5.5(a) のようにある波長（380 nm, 385 nm, ..., 780 nm）の相対分光エネルギー強度が 200 であり、他の波長の相対分光エネルギー強度が常に 20 の照明である。このような照明が 81 ある。2 種類目の照明は、図 5.5(b) のように (0, 50, 100, 150, 200) の強度を波長ごとにランダムに選択した照明である。このような照明を 109 生成した。3 種類目の照明は、CIE 標準 D 光源の八つ ( $D_{40}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{80}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{100}$ ,  $D_{110}$ ,  $D_{120}$ ) である。4 種類目は二つの黒体輻射（3000 K, 3500 K）である。

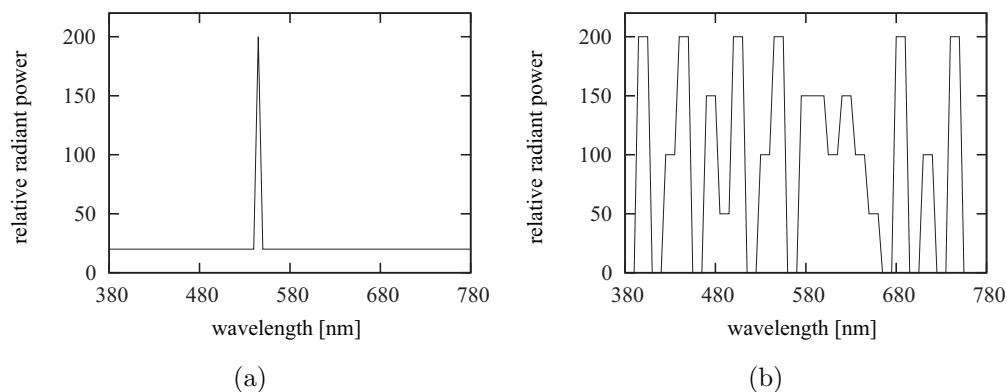


図 5.5 初期集団の遺伝子型の例 (a) 1 種類目の照明, (b) 2 種類目の照明

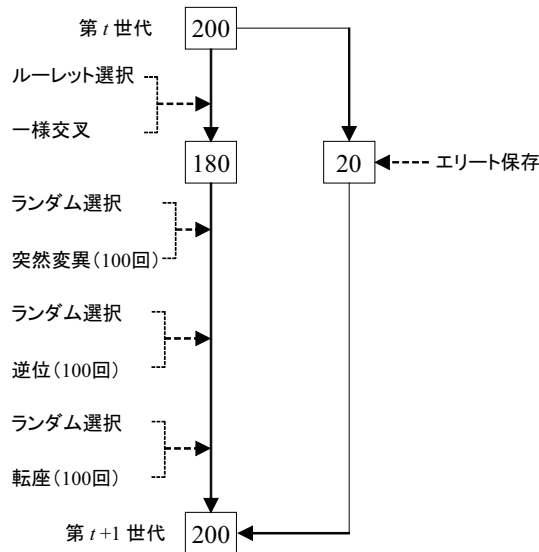


図 5.6 提案手法に関する GA の手続

提案手法に関する GA における遺伝的操作の手続を図 5.6 に示す。

選択においては、ルーレット選択とエリート保存選択を用いた。ルーレット選択は交叉のときに用いられる。200 個の個体の適合度の総和を求め、個体の適合度が総和に対して占める割合により個体を確率的に選択する。エリート保存では、集団において適合度が高い個体を 20 個選択し、次の世代のそのままコピーする。

GA の交叉について、本論文では一様交叉を用いた。一様交叉では、親世代からルーレット選択により二つの遺伝子を選び、二つの子を作る。本実験では、交叉確率を 0.45 とした。すなわち、各世代における一様交叉から作られる個体数は 180 である。

突然変異では、単一遺伝子座の突然変異、逆位、転座を用いる。単一遺伝子座の突然変異では、交叉後の個体の集合からランダムに一つの遺伝子を選び、遺伝子座の一か所をランダムに選択し、 $[0, 200]$  の整数の乱数で置き換え、一つの子を作る。本実験では、各世代における単一遺伝子座の突然変異の確率を 0.50 とした。逆位では、単一遺伝子座の突然変異をした個体群からランダムに一つの遺伝子を選び、遺伝子座の二か所をランダムに選択し、選択された遺伝子座間のデータの順序を逆にする。本実験では、逆位の確率を 0.50 とした。転座では、逆位後の個体群からランダムに一つの遺伝子を選び、遺伝子座の二か所をランダムに選択し、2 点間のデータをランダムで選んだ別の位置に移動する。本実験では、転座の確率を 0.50 とした。本論文の GA において、親世代からエリート保存により、20 個の個体が次の世代に保存され、交叉、単一遺伝子座の突然変異、逆位、転座から 180 個の個体が出来、一つの世代では、合計 200 個の個体を持つ。また、十分良い結果を得るために、適合度  $F_1^{(K)}$  と  $F_2^{(K)}$  のしきい値はそれぞれ  $\tau_1 = 0.95$  と  $\tau_2 = 1$  とした。ある世代において、各個体の最大の適合度がしきい値  $\tau$  以上になれば、GA を終了させる。



### 5.3.2 実験結果

Metro におけるある色  $((R, G, B) = (157, 5, 10))$  の分光反射率の推定結果を図 5.7 に示す. 図 5.7 では, 580 nm から 780 nm の波長の光を反射していることが分かる. 波長が 580 nm から 780 nm の光は橙色から赤色であるので, その色  $((R, G, B) = (157, 5, 10))$  は赤に近い色であることを知ることができる.

ここで, 提案手法において, パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  により考慮される画素を観察する. 図 5.8 における白い画素は  $U^{(K)}$  の要素を示す. 図 5.8(e) と 5.8(f) における赤い線で表示した部分は, Metro に対する考慮される画素の集合の特徴的な部分である. 2 色覚の種類によって  $U^{(K)}$  により考慮される要素の集合が異なること, すなわち混同色の組み合わせが異なることが分かる. 他の画像に対しても, 2 色覚の種類によって考慮する画素の集合が異なることが分かる.  $U^{(K)}$  により対象画像における混同色を持つ画素を考慮することができることを確認した.

図 5.9 は, 適合度  $F_1^{(K)}$  による最適化における各画像の最適照明下での正常色覚における見えである. 図 5.9 において,  $F_1^{(K)}$  は常に 0.95 を超えている. 図 5.10 は,  $F_1^{(K)}$  による最適化における各画像の最適照明下での 2 色覚における見えである. 図 5.10 において, 赤枠で表示している部分は, 照明 1 の下で正常色覚者が判別できるが, 2 色覚者が判別できない部分であり, 最適照明による視認性改善において注目すべき部分である. 適合度  $F_1^{(K)}$  による最適照明では, 多くの画像について K 型色覚での視認性が改善されているが, 視認性が改善されていない画像もある. 例えば, Chart に対して, 最適照明 2 での P 型色覚の視認性はあまり改善されていないままである. “26” という数字の “6” が改善されておらず, 認識しにくいことが分かる. その原因は適合度関数  $F_1^{(K)}$  にある. 適合度  $F_1^{(K)}$  は照明 2 での K 型色覚者と照明 1 での正常色覚者における局所分散間の相関係数であり, 照明 2 下での 2 色覚者にとって照明 1 下での正常色覚者と同程度のコントラストをもたらすことを保障できない.

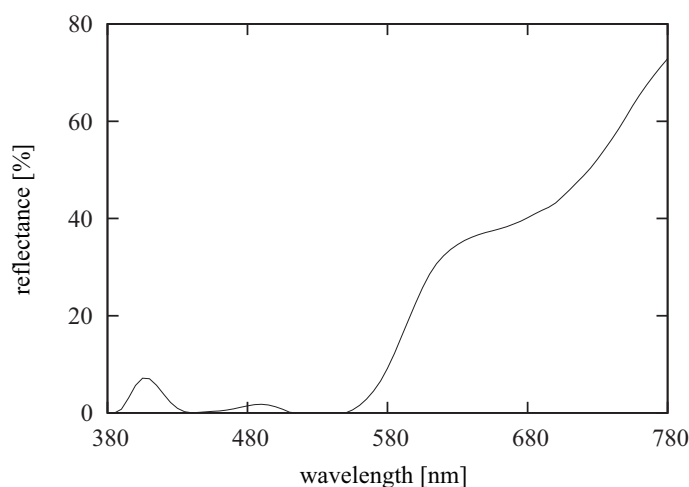


図 5.7 色  $(R, G, B) = (157, 5, 10)$  に関する表面反射率の推定結果



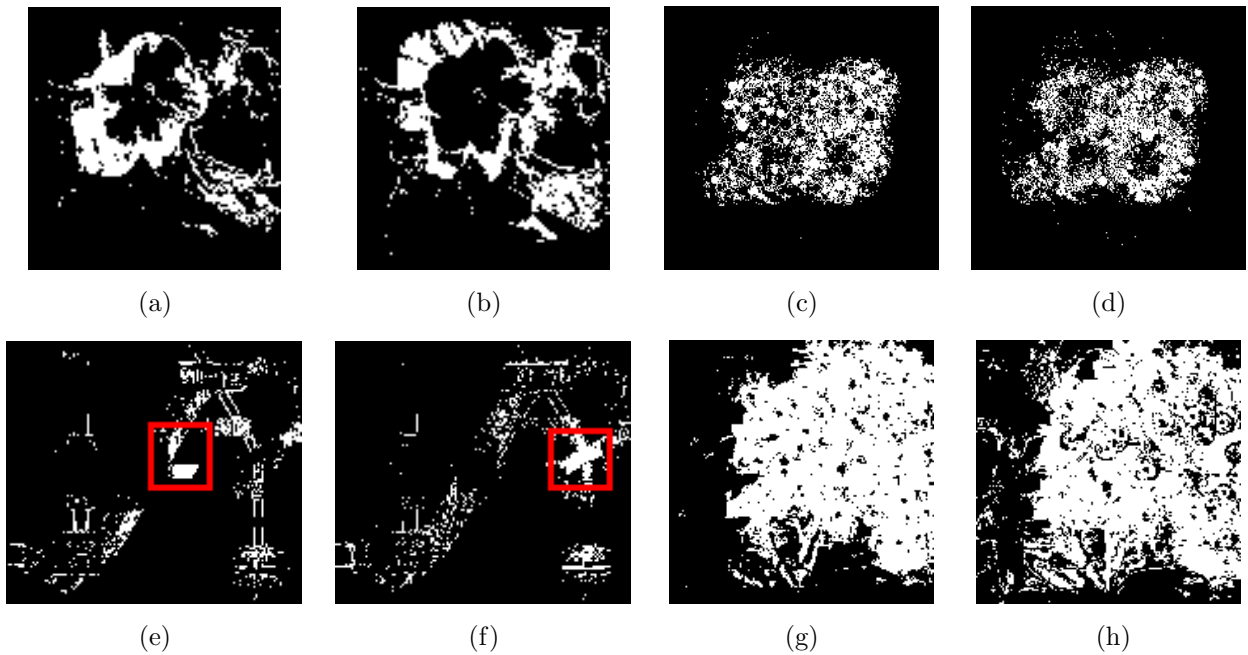


図 5.8  $F^{(K)}$  の計算において考慮される画素の集合  $U^{(K)}$ .  $U^{(K)}$  の要素を白で表す. Flower (a)  $U^{(P)}$ , (b)  $U^{(D)}$ ; Chart (c)  $U^{(P)}$ , (d)  $U^{(D)}$ ; Metro (e)  $U^{(P)}$ , (f)  $U^{(D)}$ ; Nandin (g)  $U^{(P)}$ , (h)  $U^{(D)}$ .

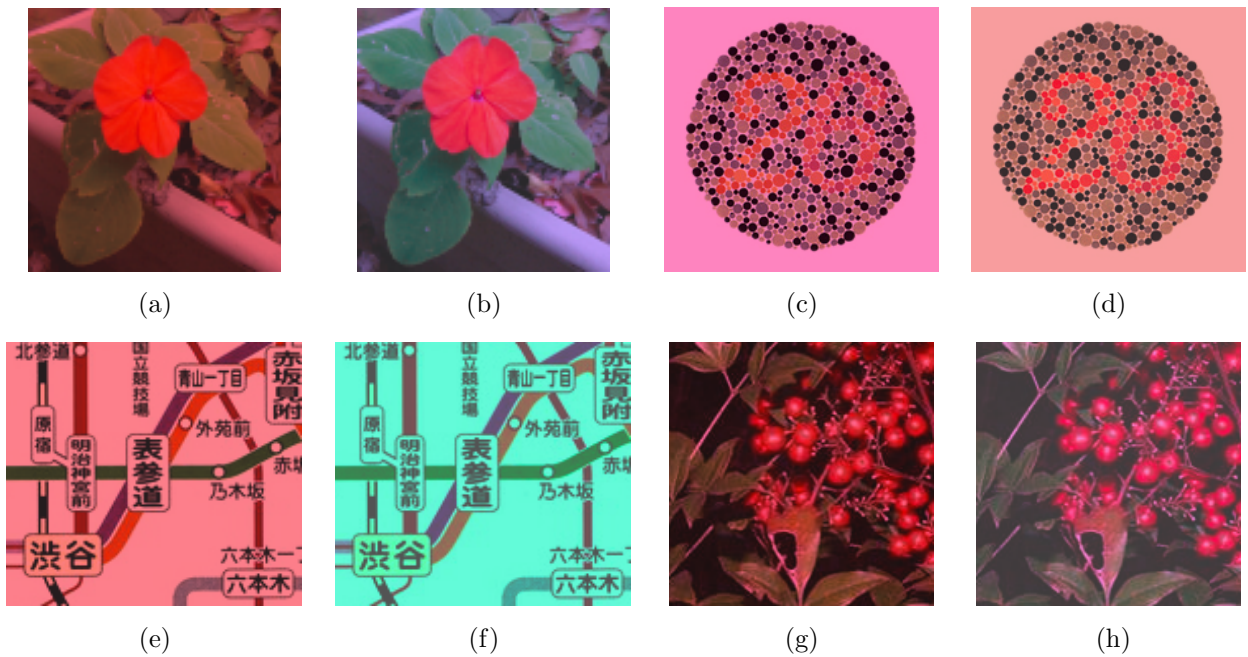


図 5.9 2色覚のための最適照明下での正常色覚者における色の見えのシミュレーション. Flower (a) P, (b) D; Chart (c) P, (d) D; Metro (e) P, (f) D; Nandin (g) P, (h) D

一方、適合度  $F_2^{(K)}$  は照明 2 での K 型色覚者と照明 1 での正常色覚者が同程度のコントラストをもたらすことが期待できる。Flower に対する適合度  $F_2^{(P)}$  の変化を図 5.11 に示す。世代数が増える

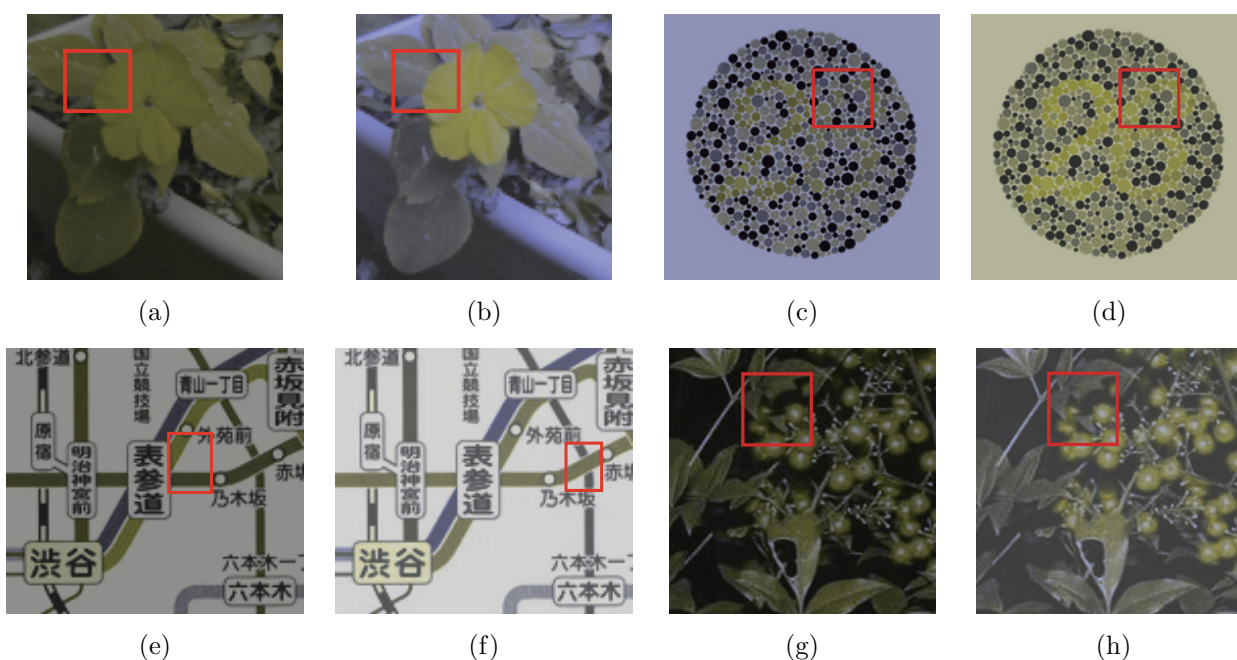


図 5.10 最適照明下での 2 色覚者における色の見えのシミュレーション。括弧内の値は  $C$  を表す。Flower (a) P (0.377), (b) D (0.546); Chart (c) P (0.441), (d) D (0.477); Metro (e) P (0.390), (f) D (0.726); Nandin (g) P (0.346), (h) D (0.398)

ことにしたがって、適合度  $F_2^{(P)}$  が増加し、世代数が 40 のときに適合度が 1 を超えていることが分かる。全ての実験画像に対して、十分な反復回数後に  $F_2^{(P)}$  が 1 を超えることを確認した。

P 型色覚に対して、Flower に対する GA の各世代における最適照明の相対分光スペクトル分布を図 5.12 に示す。世代数が増えることによって最適照明の相対分光スペクトル分布も変わることが分かる。また、Flower に対して、各世代の最適照明下での正常色覚の色の見えのシミュレーション結果を図 5.13 に示す。世代数が増えることによって、正常色覚者の見えが変わっていることが分かる。図 5.13 について、P 型色覚の色の見えのシミュレーション結果を図 5.14 に示す。世代数が増えるほど、P 型色覚において色の差が感じられるようになっていくことが分かる。 $t$  が 40 のとき、P 型色覚において、葉と実の色の違いを完全に弁別できるようになっていることが分かる。

図 5.15 は各実験画像における最適照明の光源スペクトルである。実験画像によって、最適光源の分光スペクトル分布が異なり、色覚の種類によっても最適光源の分光スペクトル分布が異なることが分かる。

図 5.16 は、各画像の最適照明下での正常色覚における見えである。図 5.17 は、各画像の最適照明下での 2 色覚における見えである。Flower では、P 型、D 型色覚ともに花と葉の色を弁別できることが分かる。Chart では、色弁別が容易になっていることが分かる。Metro において、照明 1 では混同して見える部分が、最適照明 2 下では 2 色覚の見えが改善されていることが分かる。Nandin においては、2 色覚者は花と葉の色の差を区別できていることが分かる。結果として、適合度関数  $F_2^{(K)}$  が適合度関数  $F_1^{(K)}$  より良いことを確認できた。

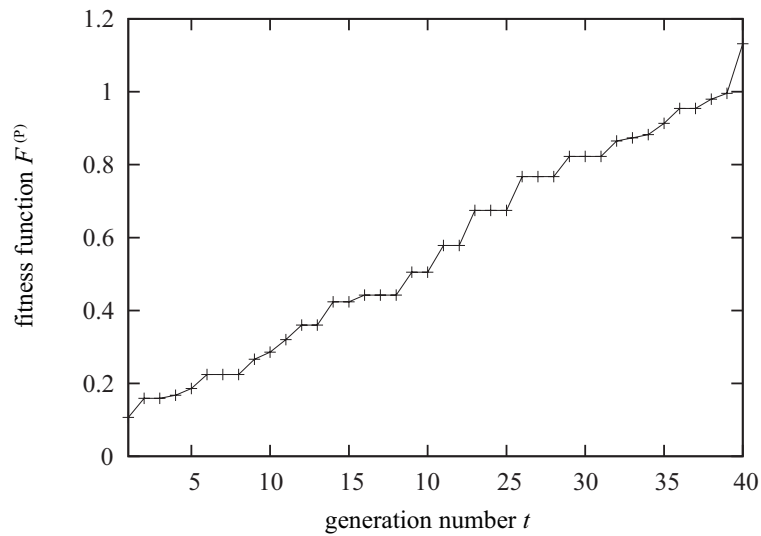


図 5.11 Flower に対する各世代の  $F^{(P)}$  の最大値

以上の実験は、可視光領域における自由な光源スペクトル空間において最適照明の検討を行った。シミュレーション結果から、提案手法における適合度関数  $F_2^{(K)}$  が 2 色覚者の視認性改善に有効であることを確認できた。しかし、図 5.15 で示すように、得られた照明の相対分光スペクトルは複雑であり、実際に作成するのは高コストである。一方、ヒトの目は照明の分光スペクトル分布における細かな変化を感じることはできない。実用性を高めるためには、最適照明における重要な部分を保存しつつ細かな部分を除去することで、分光スペクトル分布を簡易にする必要がある。

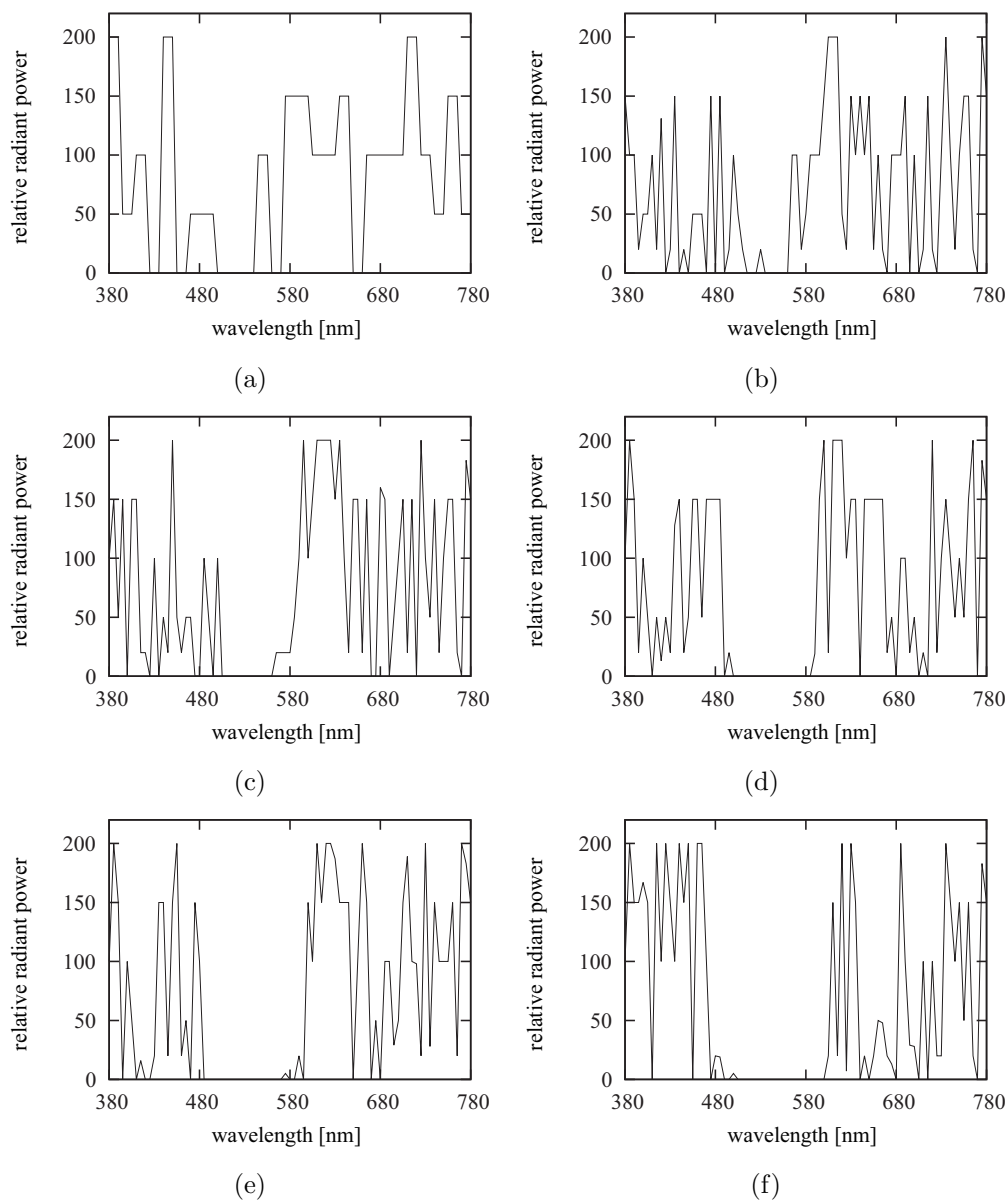


図 5.12 Flower に対する世代  $t$  における P 型色覚での最適照明の分光スペクトル分布 (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 8$ , (c)  $t = 16$ , (d)  $t = 24$ , (e)  $t = 32$ , (f)  $t = 40$

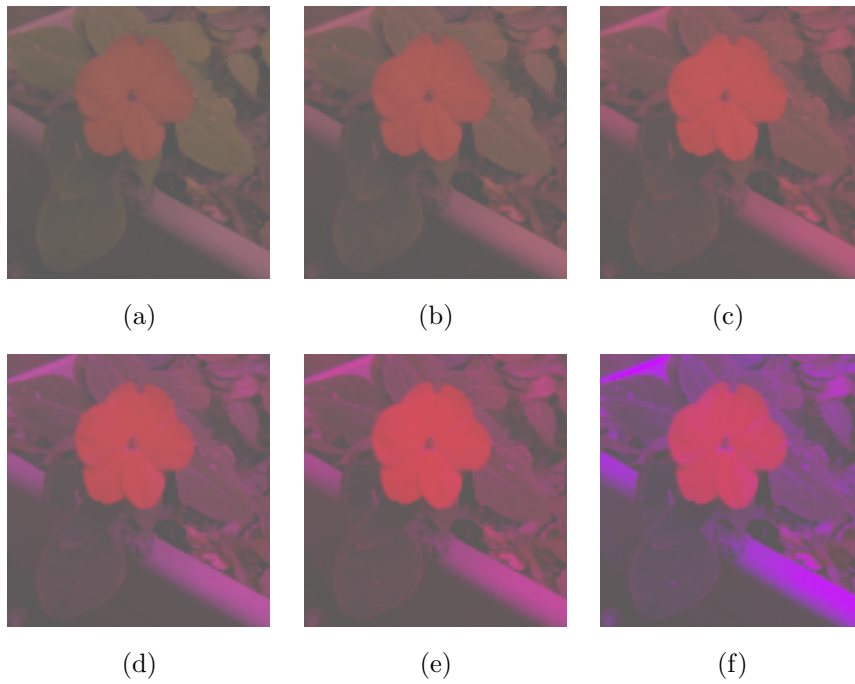


図 5.13 Flower に対する世代  $t$  の最適照明における正常色覚での見え.  $C$  は 0.179 とした. (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 8$ , (c)  $t = 16$ , (d)  $t = 24$ , (e)  $t = 32$ , (f)  $t = 40$

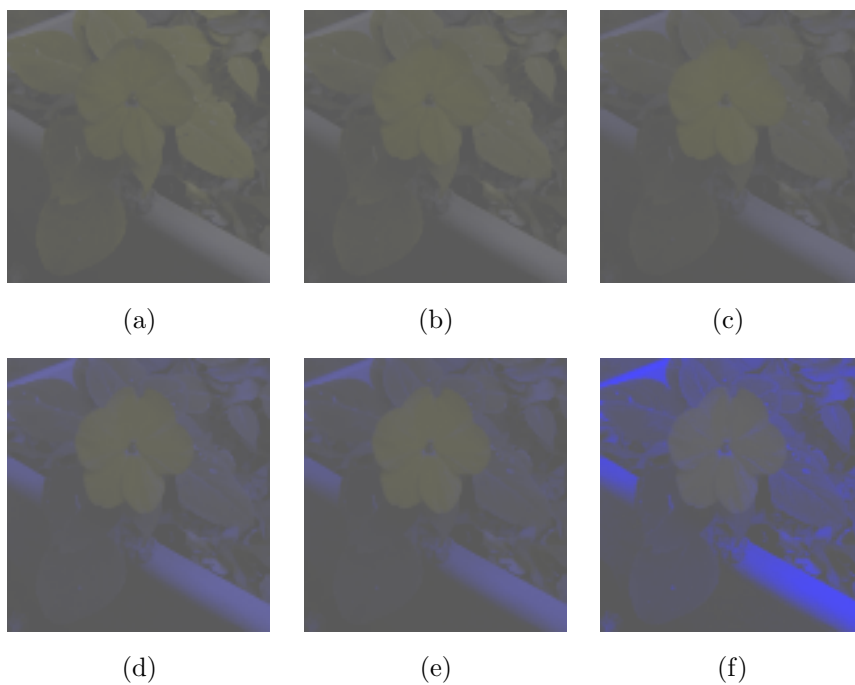


図 5.14 Flower に対する世代  $t$  の最適照明における P 型色覚での見え.  $C$  は 0.179 とした. (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 8$ , (c)  $t = 16$ , (d)  $t = 24$ , (e)  $t = 32$ , (f)  $t = 40$

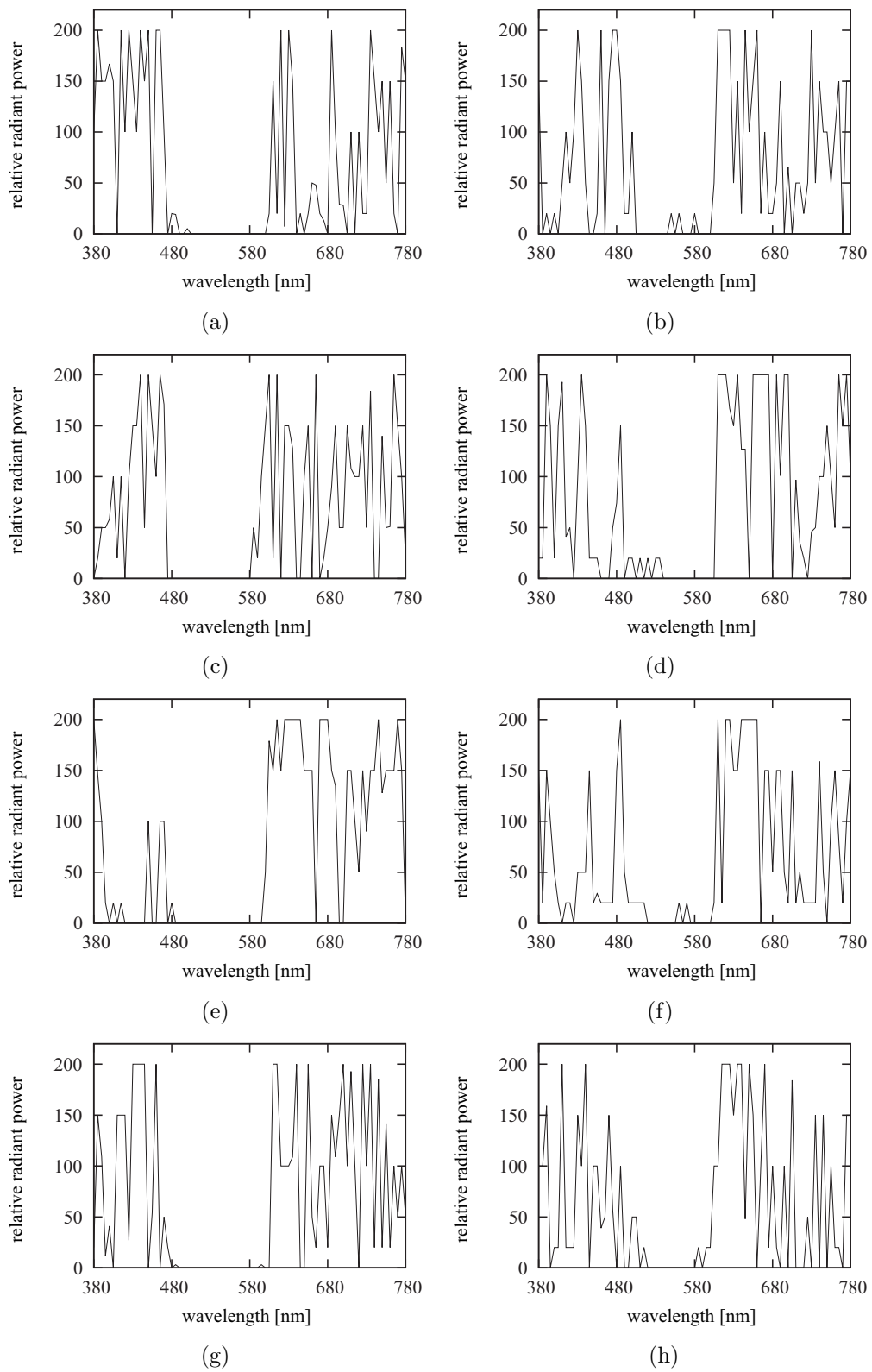


図 5.15 実験画像に対する最適照明の分光スペクトル分布. Flower (a) P, (b) D ; Chart (c), (d) D ; Metro (e) P, (f) D ; Nandin (g) P, (h) D



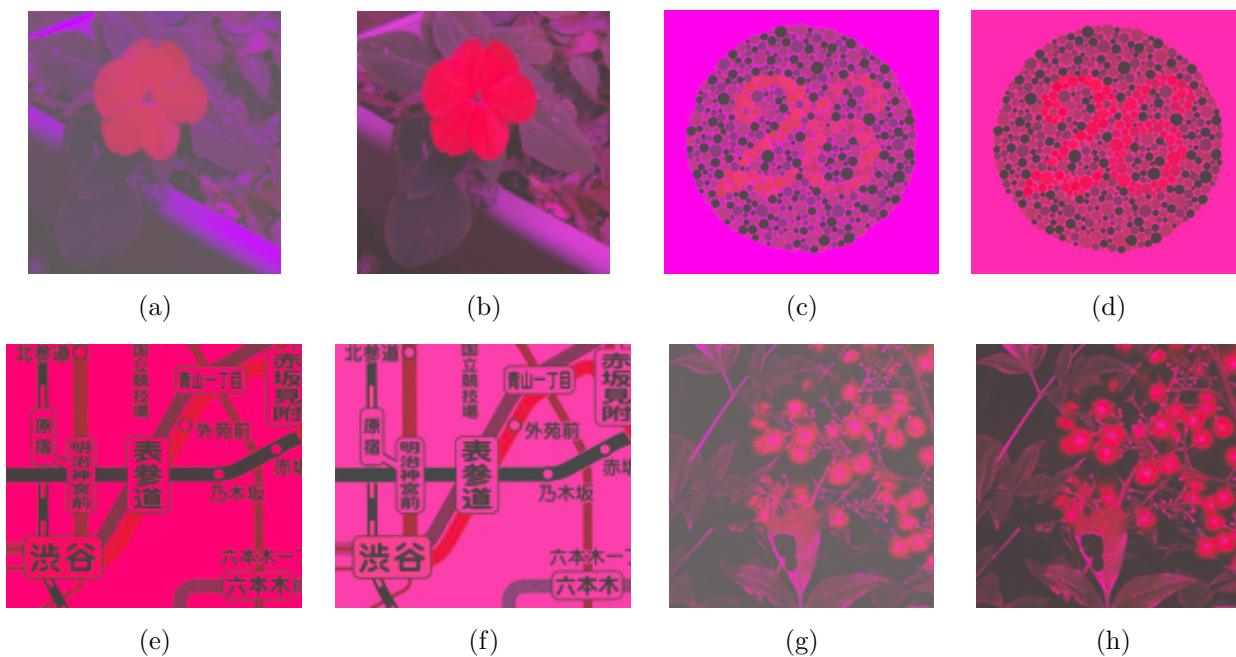


図 5.16 2色覚のための最適照明下での正常色覚者における色の見えのシミュレーション. Flower (a) P, (b) D; Chart (c) P, (d) D; Metro (e) P, (f) D; Nandin (g) P, (h) D

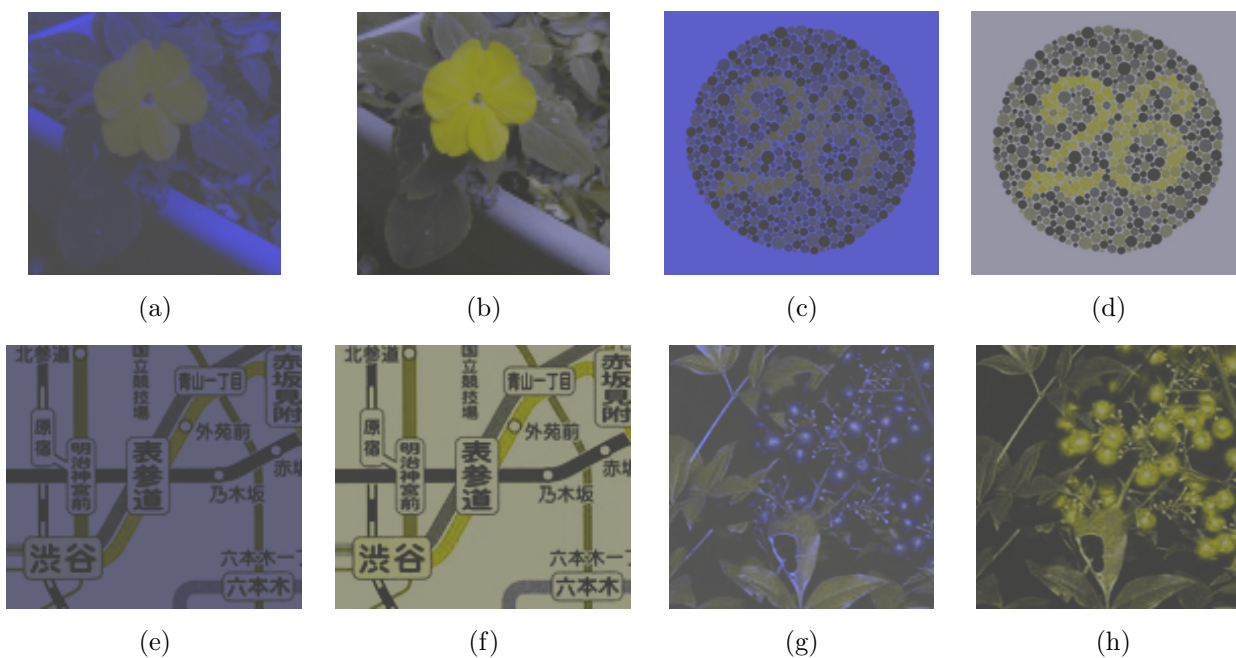


図 5.17 最適照明下での2色覚者における色の見えのシミュレーション. 括弧内の値は  $C$  である. Flower (a) P (0.226), (b) D (0.280); Chart (c) P (0.202), (d) D (0.205); Metro (e) P (0.199), (f) D (0.233); Nandin (g) P (0.196), (h) D (0.223)

## 5.4 EM アルゴリズムによる最適照明の近似

本節では、前節で求めた最適照明の分光スペクトル分布を混合ガウス分布により近似することを考える。混合ガウス関数を用いて近似することにより、最適照明における細かな部分を除去し、重要な部分を保存できるか否かを検証する。

最適照明 2 の相対分光スペクトル分布  $S^{(2)}(\lambda)$  に対する近似混合ガウス分布  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda)$  を

$$\tilde{S}^{(2)}(\lambda) = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{a_i}{\sqrt{2\pi c_i^2}} \exp \left[ -\frac{(\lambda - b_i)^2}{2c_i^2} \right] \right\} \quad (5.3)$$

で定義する。ここで、 $a_i$  は新しく導入したパラメータであり、 $i$  番目のガウス分布の高さを調整するものである。第 4.2.3 節で述べた混合正規分布に対する EM アルゴリズムの反復では、 $a_i$  は含まれていない。近似照明  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda)$  を求めるためには、まず、 $a_i$  を求める必要がある。

最適照明  $S^{(2)}(\lambda)$  との平均 2 乗誤差 (mean square error : MSE) が最小となる照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  を求め、照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  のパラメータ  $\hat{a}_i$  を用いて  $a_i$  を求める。なお、 $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  の定義は、

$$\hat{S}^{(2)}(\lambda) = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\hat{a}_i}{\sqrt{2\pi \hat{c}_i^2}} \exp \left[ -\frac{(\lambda - \hat{b}_i)^2}{2\hat{c}_i^2} \right] \right\} \quad (5.4)$$

である。最適照明  $S^{(2)}(\lambda)$  と照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  間における MSE を

$$\text{MSE} = \frac{1}{81} \sum_{i=0}^{80} \left[ \hat{S}^{(2)}(380 + 5i) - S^{(2)}(380 + 5i) \right]^2 \quad (5.5)$$

で定義する。 $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  を得た後、 $\hat{a}_i$  の総和  $\hat{A}$  を

$$\hat{A} = \sum_{i=1}^m \hat{a}_i \quad (5.6)$$

で得る。 $\hat{A}$  を用いて、EM アルゴリズムの  $t$  回目の反復における  $a_i^{(t)}$  が

$$a_i^{(t)} = \hat{A} \xi_i^{(t)} \quad (5.7)$$

で得られる。

照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  を求める実験では、6 個のガウス分布を用いて近似を行う。実験では、1 回の近似計算において、パラメータ  $\hat{a}_i$ ,  $\hat{b}_i$ ,  $\hat{c}_i$  の初期値をランダムで設定し、対応する照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  の MSE を求める。 $\hat{a}_i$  については  $[0, 15000]$  の整数をランダムで発生させ、初期値とした。 $i$  番目のガウス分布の平均値  $\hat{b}_i$  の初期値は可視光域内になるように、 $[380, 780]$  の整数をランダムで発生させた。 $\hat{c}_i$  については、 $[1, 30]$  の値をランダムで発生させ、初期値とした。 $\hat{a}_i$ ,  $\hat{b}_i$ ,  $\hat{c}_i$  の更新量の絶対値は常に 1 とした。各パラメータの値を正・負の方向に修正し、得られた新たな混合ガウス分布の MSE を求め、MSE が小さい方向の値を用いてパラメータを修正する。MSE の減少がなくなるまで、この



表 5.1 最適照明と近似最適照明の分光スペクトル分布における  $\hat{A}$  と MSE の値

Image	P		D	
	$\hat{A}$	MSE	$\hat{A}$	MSE
Flower	31950	46.1	30112	43.3
Chart	26952	45.4	31739	44.4
Metro	48880	30.5	37739	40.2
Nandin	28853	46.7	36803	47.5

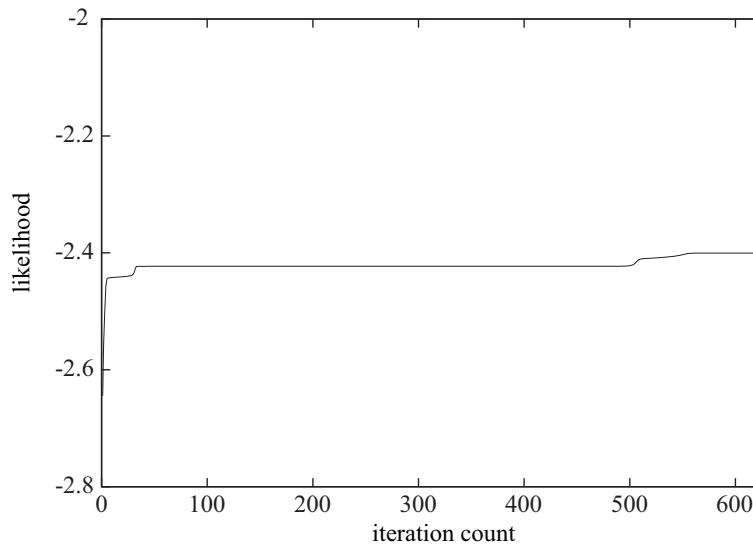


図 5.18 Flower に対する各反復での対数尤度値

ような繰り返しを行う。しかし、このような近似計算では、初期値により MSE が最小となる混合ガウス分布を得られないことがある。できるだけ MSE が準最小値を持つ照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  を求めるために、本実験では上述した計算を 10,000 回行い、MSE が最小となるものを求めた。実験において、MSE が最小となった照明  $\hat{S}^{(2)}(\lambda)$  におけるパラメータ  $\hat{a}_i$  の合計  $\hat{A}$  を表 5.1 に示す。

次に、EM アルゴリズムにより最適照明の近似を行う。EM アルゴリズムにおいて、パラメータ  $\xi_i, b_i, c_i$  の初期値をランダムで設定し、反復により近似を行う。 $b_i, c_i$  の初期値は上述した方法と同じように設定した。ただし、 $\xi_i$  については 3 から 13 までの整数をランダムで発生し、その値が総和に占める割合を  $\xi_i$  の初期値とした。また、実際の計算において  $c_i$  の値が 0 になることがあり、プログラム上エラーとなることがある。そのエラーを回避するために、 $c_i$  の値が 1 以下になる場合、 $c_i = 1$  とする。

P 型色覚の最適照明に対して EM アルゴリズムを適用した際の尤度の変化を図 5.18 に示す。EM アルゴリズムにおいて、処理の反復したがつて尤度も上がっていくことが分かる。EM アルゴリズムによる近似した混合ガウス関数のパラメータを表 5.2 に示す。近似混合ガウス分布を図 5.19 に示す。

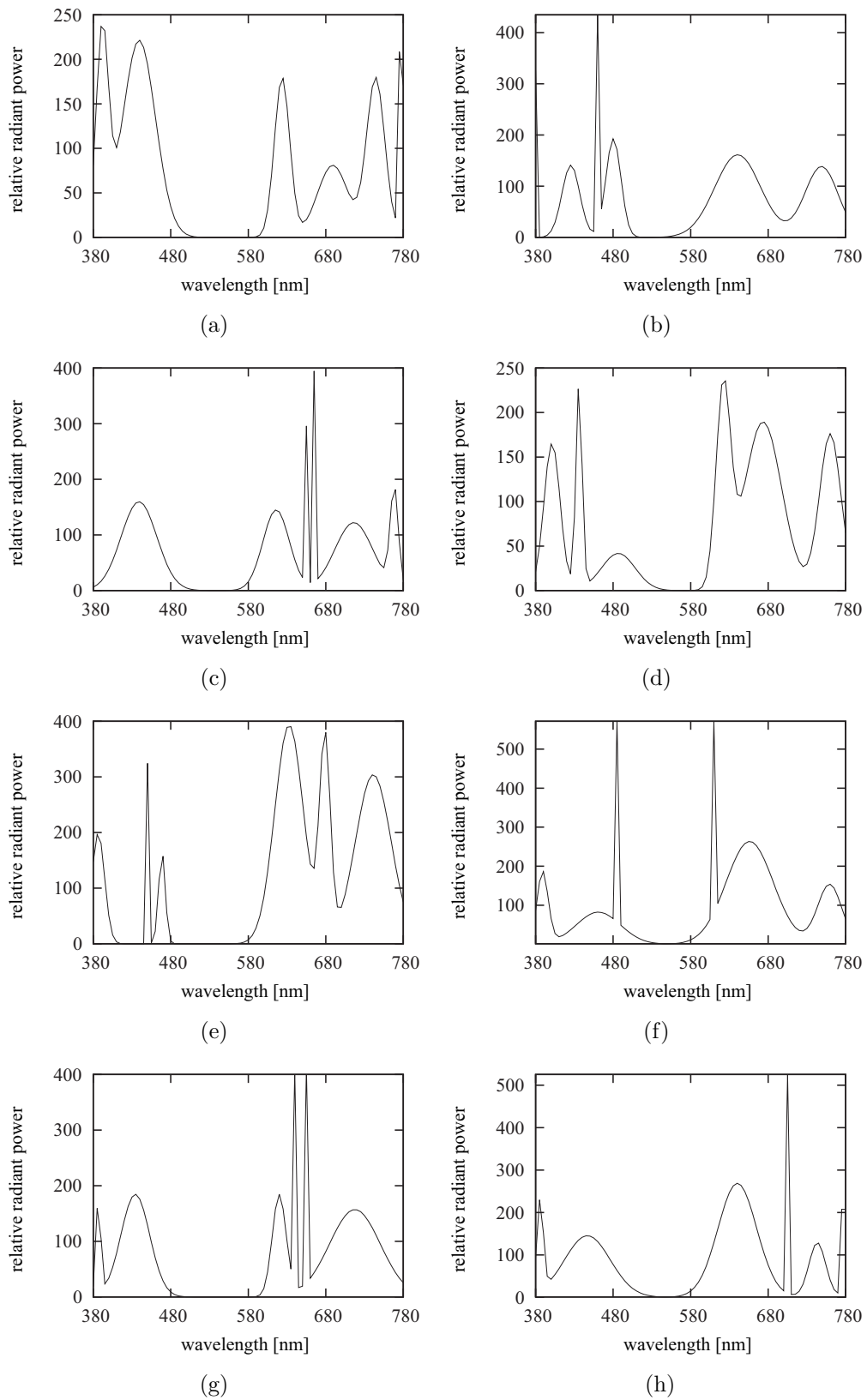


図 5.19 実験画像に対する近似最適照明の分光スペクトル分布. Flower (a) P, (b) D ; Chart (c) P, (d) D ; Metro (e) P, (f) D ; Nandin (g) P, (h) D

表 5.2 近似混合ガウス分布における各ガウス関数のパラメータ

		Flower			Chart		
Function		$a$	$b$	$c^2$	$a$	$b$	$c^2$
P	1	11762	439	449	6233	616	294
	2	5295	745	140	9243	439	533
	3	1916	777	6	949	665	1
	4	4462	624	98	701	655	1
	5	4029	689	394	2326	768	27
	6	4486	392	62	7500	716	599
D	1	11989	641	877	2287	487	478
	2	4690	480	94	2306	436	16
	3	4087	426	133	4330	401	109
	4	817	380	1	5144	622	87
	5	7497	749	466	6177	760	196
	6	1032	460	1	11494	673	586
		Metro			Nandin		
Function		$a$	$b$	$c^2$	$a$	$b$	$c^2$
P	1	1790	469	19	962	655	1
	2	17604	741	533	8585	434	344
	3	814	450	1	12923	718	1076
	4	6237	679	48	1344	386	9
	5	4117	386	68	966	640	1
	6	18319	633	346	4074	620	79
D	1	20029	656	920	2133	778	6
	2	1225	610	1	3504	744	118
	3	1289	485	1	1293	705	1
	4	3337	389	52	10791	447	878
	5	6019	759	246	16824	640	624
	6	5839	461	802	2257	386	17

最適照明と近似照明の適合度  $F_2^{(K)}$  の値を表 5.3 に示す. 表 5.3 から近似照明の適合度  $F_2^{(K)}$  の値が最適照明の適合度  $F_2^{(K)}$  の値より全て低くなっていることが分かる. 図 5.20 では, 近似照明下における正常色覚者の見え画像のシミュレーション結果を示す. 図 5.21 は, 近似照明での 2 色覚者の見えのシミュレーション結果を示す. 実験画像に対して, 近似照明下でも 2 色覚者の視認性が改善されていることが分かる. 実験結果から, 混合ガウス分布からなる照明でも 2 色覚者の視認性を改善できることが確認された. この 4 枚の実験画像では近似照明としたときに適合度が少し低下した程度であったが, いかなる画像に対しても良好な近似照明が得られるとは限らない. すなわち,

表 5.3 最適照明と近似最適照明の適合度  $F_2^{(K)}$  の値

Image	P		D	
	最適照明	近似最適照明	最適照明	近似最適照明
Flower	1.132	1.026	1.087	0.871
Chart	1.042	0.905	1.013	0.991
Metro	1.008	0.860	1.116	0.898
Nandin	1.032	0.979	1.027	0.911

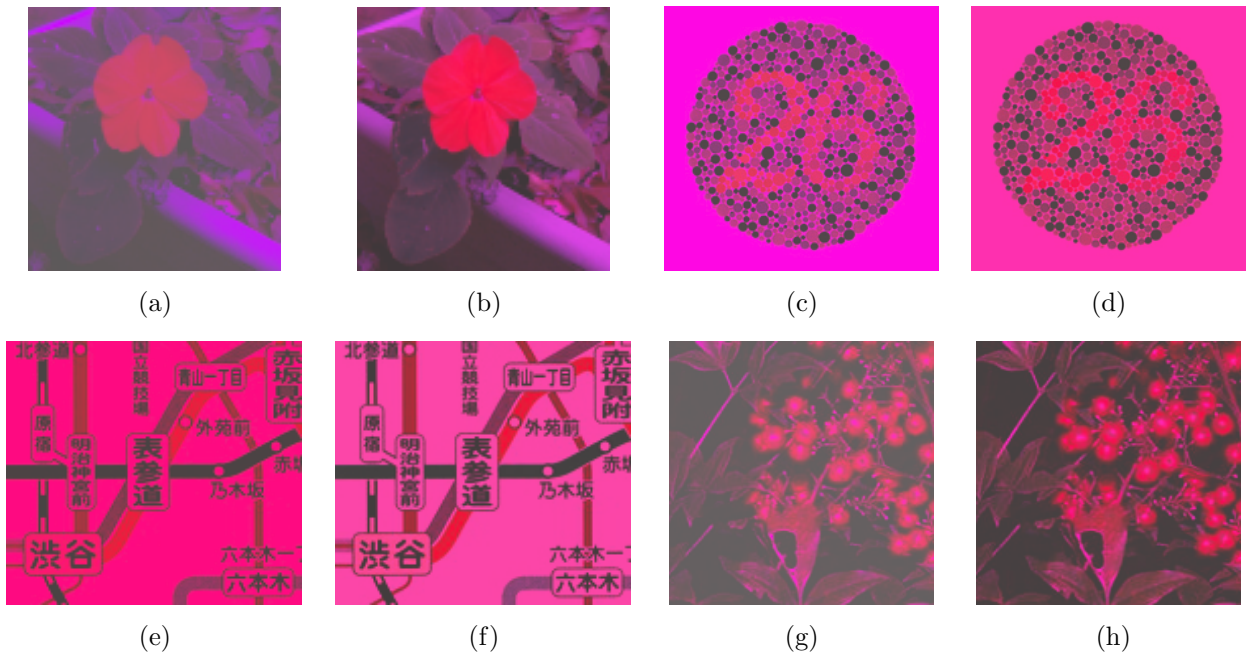


図 5.20 2色覚のための近似最適照明下での正常色覚者における色の見えのシミュレーション. Flower (a) P, (b) D; Chart (c) P, (d) D; Metro (e) P, (f) D; Nandin (g) P, (h) D

近似により適合度が大きく低下する可能性がある。

## 5.5 混合ガウス分布を用いた GA による最適化

5.3 節で示したように、分光スペクトル分布を自由に操作することにより、2色覚者に対して最適照明を得ることができるが、最適照明の分光スペクトル分布は多数のピークを持つ可能性が高い。そのようなスペクトルを持つ照明は作成が難しく、実用的ではない。5.4 節では、混合ガウス分布からなる照明でも2色覚者の視認性を改善できることを確認した。本節では、重要なピークのみを持つ適合度が高い最適照明の分光スペクトル分布を得るために、混合ガウス分布により適合度関数  $F_2^{(K)}$  を最適化することを試みる。まず GA の設計について述べ、次にシミュレーション実験を行う。

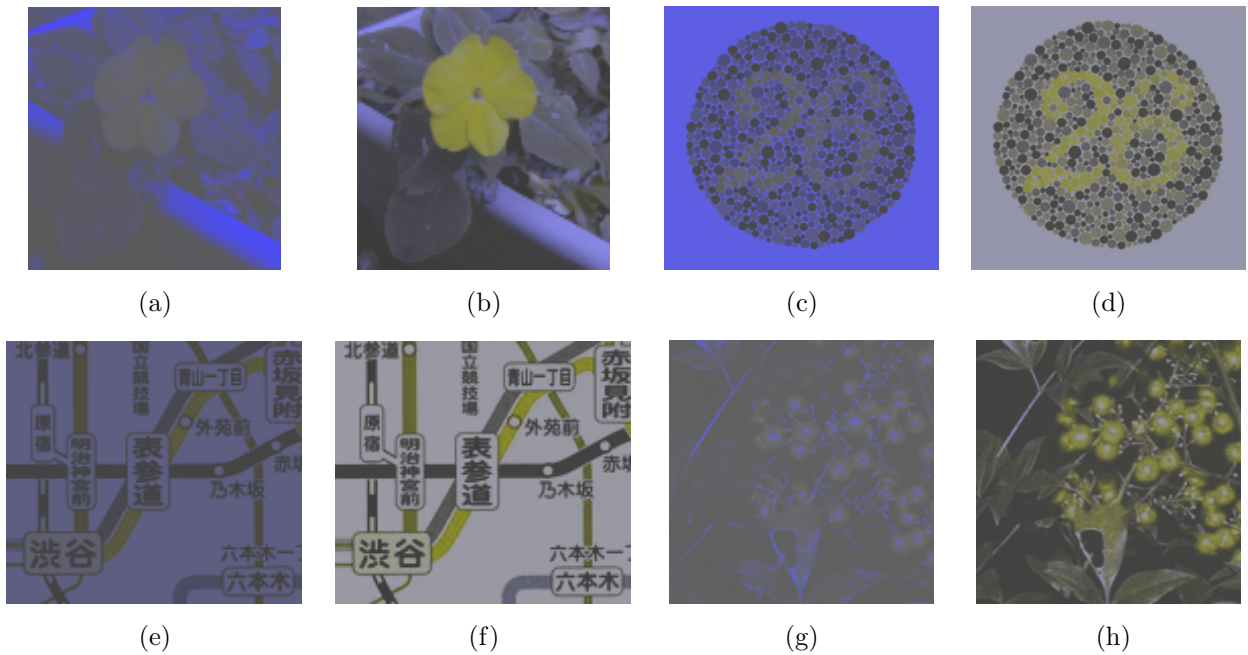


図 5.21 近似最適照明下での 2 色覚者における色の見えのシミュレーション．括弧内の値は  $C$  を表す．Flower (a) P (0.143), (b) D (0.315); Chart (c) P (0.217), (d) D (0.215); Metro (e) P (0.185), (f) D (0.251); Nandin (g) P (0.160), (h) D (0.224)

### 5.5.1 GA の設計

まず，GA の初期集団における個体の作り方について述べる．ここでは，照明の分光スペクトル分布が六つのガウス関数からなる混合ガウス分布  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda)$  であると考え．一個の遺伝子は，六つガウス関数に関する  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  の合計 18 個のパラメータを含む．なお，混合ガウス分布  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda)$  において，任意の波長において  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda) \leq 200$  になるよう制限を設けた．すなわち， $\tilde{S}^{(2)}(\lambda) > 200$  である値を持つ個体は除外する． $a_i$  については， $[100, 10000]$  の整数をランダムで発生させた． $b_i$  の値は波長であるので， $[380, 780]$  の整数をランダムで発生させた． $c_i^2$  は  $i$  番目ガウス関数の分散である． $[10, 2000]$  の整数をランダムで発生させ， $c_i^2$  の値とした．上述した手順により一つの個体を作られ，GA の初期集団はこのような個体からなる．初期集団のサイズは 50 とした．

混合ガウス分布を用いた GA における遺伝的操作の手続を図 5.22 に示す．

選択においては，ルーレット選択とエリート保存選択を用いた．エリート保存において，適合度が高い 10 個の個体を選択し，次の世代にコピーする．ルーレット選択により選択した遺伝子間において，交叉を行い，40 個の個体を作る．交叉においては，対応するパラメータ間のみにおいて一様交叉を行う．例えば，ルーレット選択により選んだ二つの個体において，パラメータ  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  の中から一つのパラメータをランダムで選び，一様交叉を行う．交叉により作られた個体が条件  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda) \leq 200$  を満たさない場合はその個体を除外し，再度，選択及び交叉を行う．交叉により作られる個体数を 40 とした．

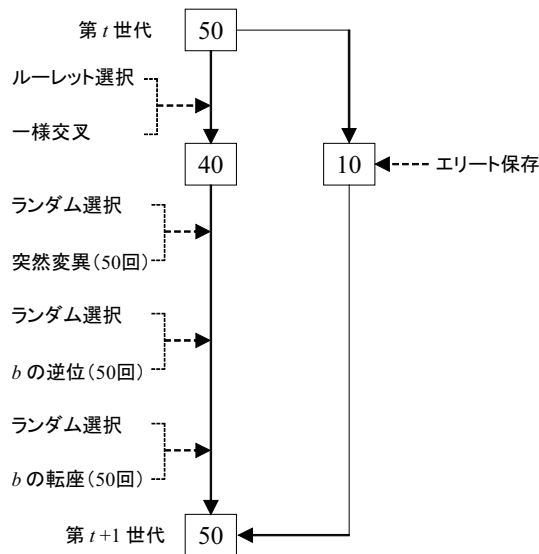


図 5.22 混合ガウス分布を用いた GA の手続

突然変異においては、まず、交叉より作られた 40 個の個体群からランダムで一つの個体を選ぶ。次に、その個体において、六つのガウス関数から一つをランダムで選び、そのガウス関数におけるパラメータ  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  の中から一つのパラメータをランダムで選び、突然変異を行う。  $a_i$  の突然変異においては、 $[100, 10000]$  の整数をランダムで発生させ、  $a_i$  の値を置き換える。  $b_i$  の突然変異では、 $[380, 780]$  の整数をランダムで発生させ、元の  $b_i$  の値を置き換える。  $c_i^2$  の突然変異においては、 $[10, 2000]$  の値をランダムで発生させ、  $c_i^2$  の値とした。突然変異により作られた個体が条件  $\tilde{S}^{(2)}(\lambda) \leq 200$  を満たさない場合はその個体を除外し、再度、選択・突然変異を行う。突然変異の数を 50 回とした。

次に、突然変異を行った 40 個の個体群において、一つの個体をランダムで選ぶ。選んだ個体における六つのガウス関数の  $b_i$  の値を昇順に並べ、その中から二つの  $b_i$  をランダムで選び、その 2 点間の波長に対し逆位を行う。本論文では、逆位の数を 50 回とした。

続いて、逆位を行った 40 個の個体群において、一つの個体をランダムで選び、ガウス関数の  $b_i$  を昇順に並べ、ランダムで 2 つの  $b_i$  を選び、転座を行う。転座の数を 40 回とした。

GA の終了条件については、適合度のしきい値  $\tau$  を 1 とした。

### 5.5.2 実験結果

混合ガウス分布を用いた GA での最適化について、Flower に対する P 型色覚の適合度の変化を図 5.23 に示す。世代数の増加につれて適合度が増加し、世代数が 10 のときに適合度が 1 を超えていることが分かる。各世代の最適照明の分光スペクトル分布を図 5.24 に示す。世代数が増えるにしたがって、最適照明の分光スペクトル分布が変化していることが分かる。各世代の最適照明下での正常色覚者の見えのシミュレーション結果を図 5.25 に示す。図 5.25 の P 型色覚者の見えのシ

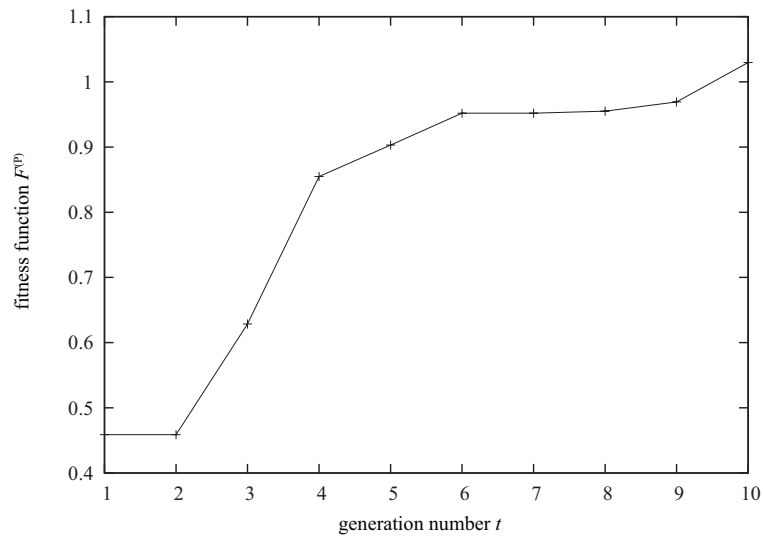


図 5.23 Flower に対する混合ガウス分布による最適化における各世代の  $F^{(P)}$  の最大値

ミュレーション結果を図 5.26 に示す．世代が増えるにしたがって，P 型色覚の視認性が改善されていることが分かる．

2 色覚に対する各画像の最適照明の分光スペクトル分布を図 5.27 に示す．2 色覚の種類と画像によって最適照明の分光スペクトル分布が異なることが分かる．各画像の最適照明下での正常色覚の見えるのシミュレーション画像を図 5.28 に示す．各画像の最適照明下での 2 色覚の見えるのシミュレーション画像を図 5.28 に示す．最適照明下において，2 色覚者の視認性が改善されていることが分かる．

以上より，混合ガウス分布を用いた GA による最適化の有効性が確認されたといえる．

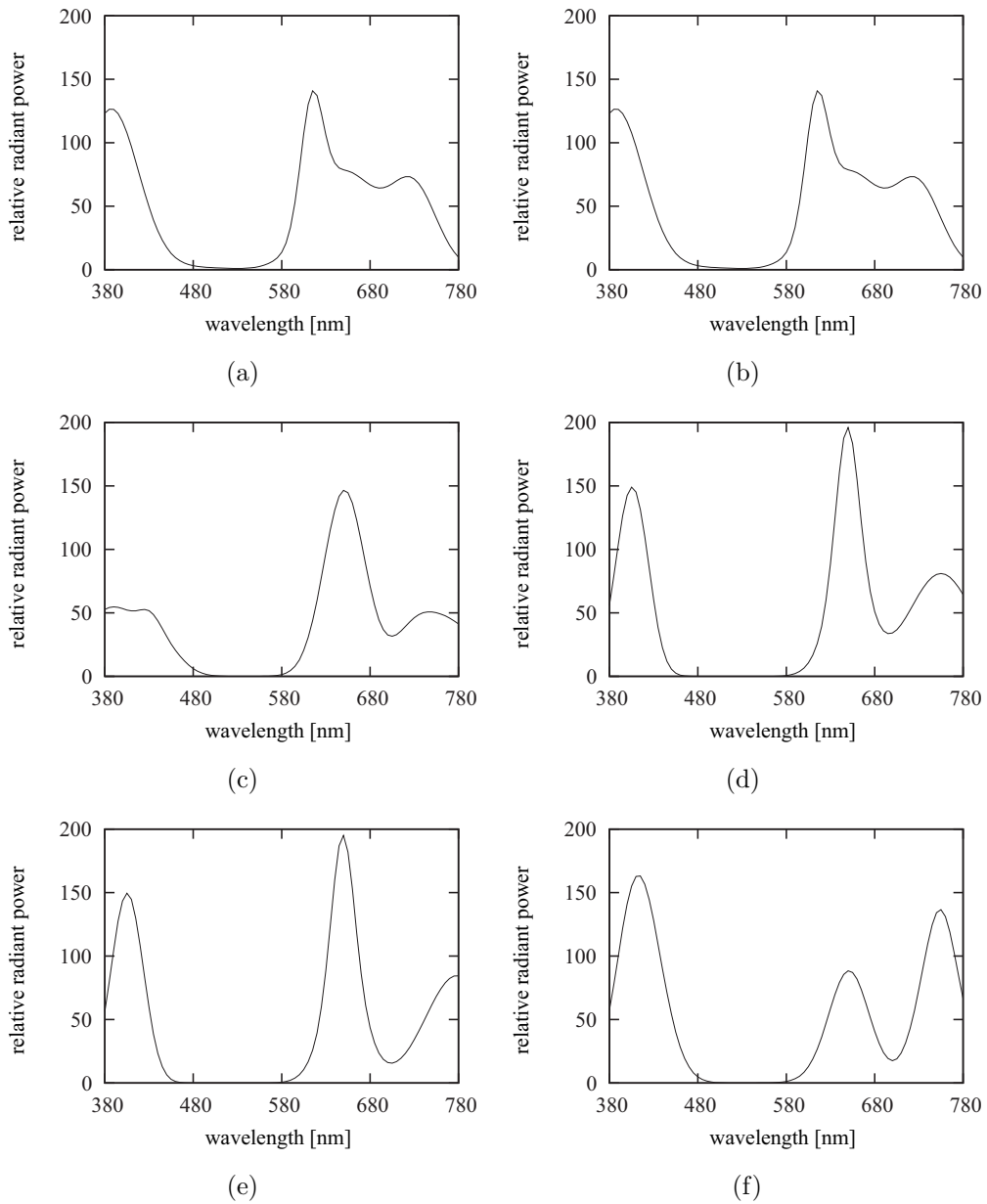


図 5.24 Flower に対する世代  $t$  における P 型色覚での最適光源の分光スペクトル分布 (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 2$ , (c)  $t = 4$ , (d)  $t = 6$ , (e)  $t = 8$ , (f)  $t = 10$



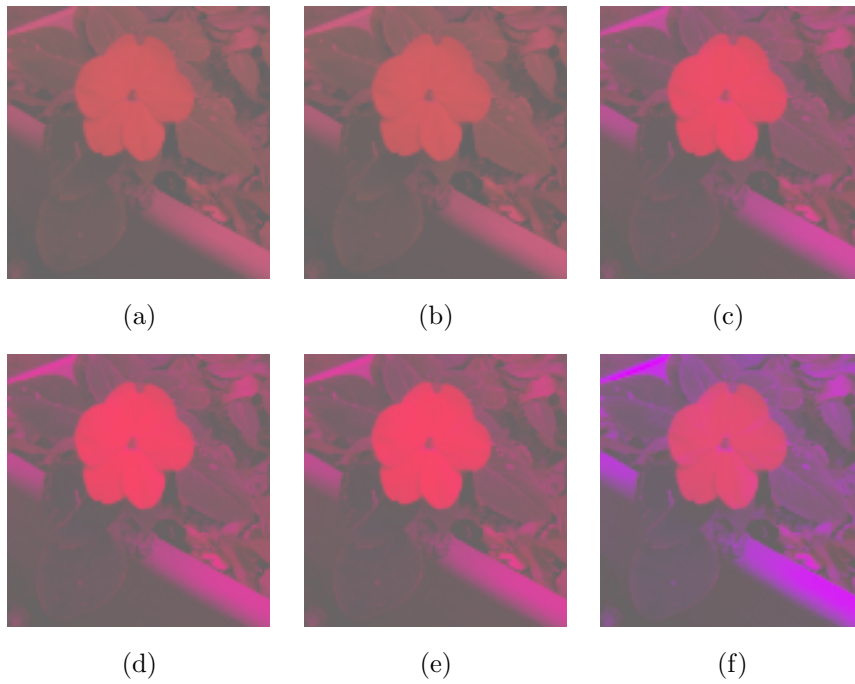


図 5.25 Flower に対する世代  $t$  の最適照明下での正常色覚における見え.  $C$  は 0.150 とした. (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 2$ , (c)  $t = 4$ , (d)  $t = 6$ , (e)  $t = 8$ , (f)  $t = 10$

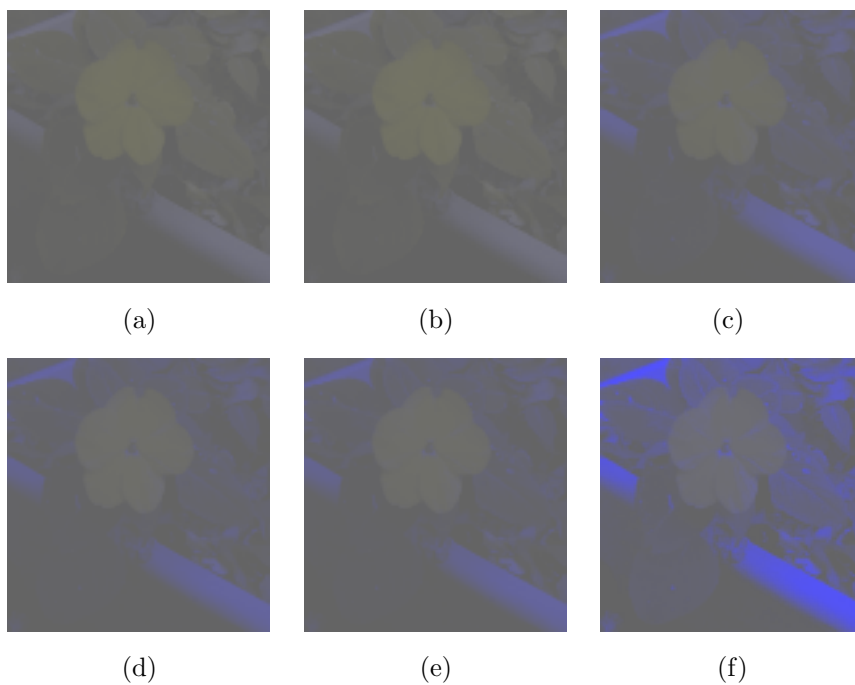


図 5.26 Flower に対する世代  $t$  の最適照明における P 型色覚での見え.  $C$  は 0.150 とした. (a)  $t = 1$ , (b)  $t = 2$ , (c)  $t = 4$ , (d)  $t = 6$ , (e)  $t = 8$ , (f)  $t = 10$

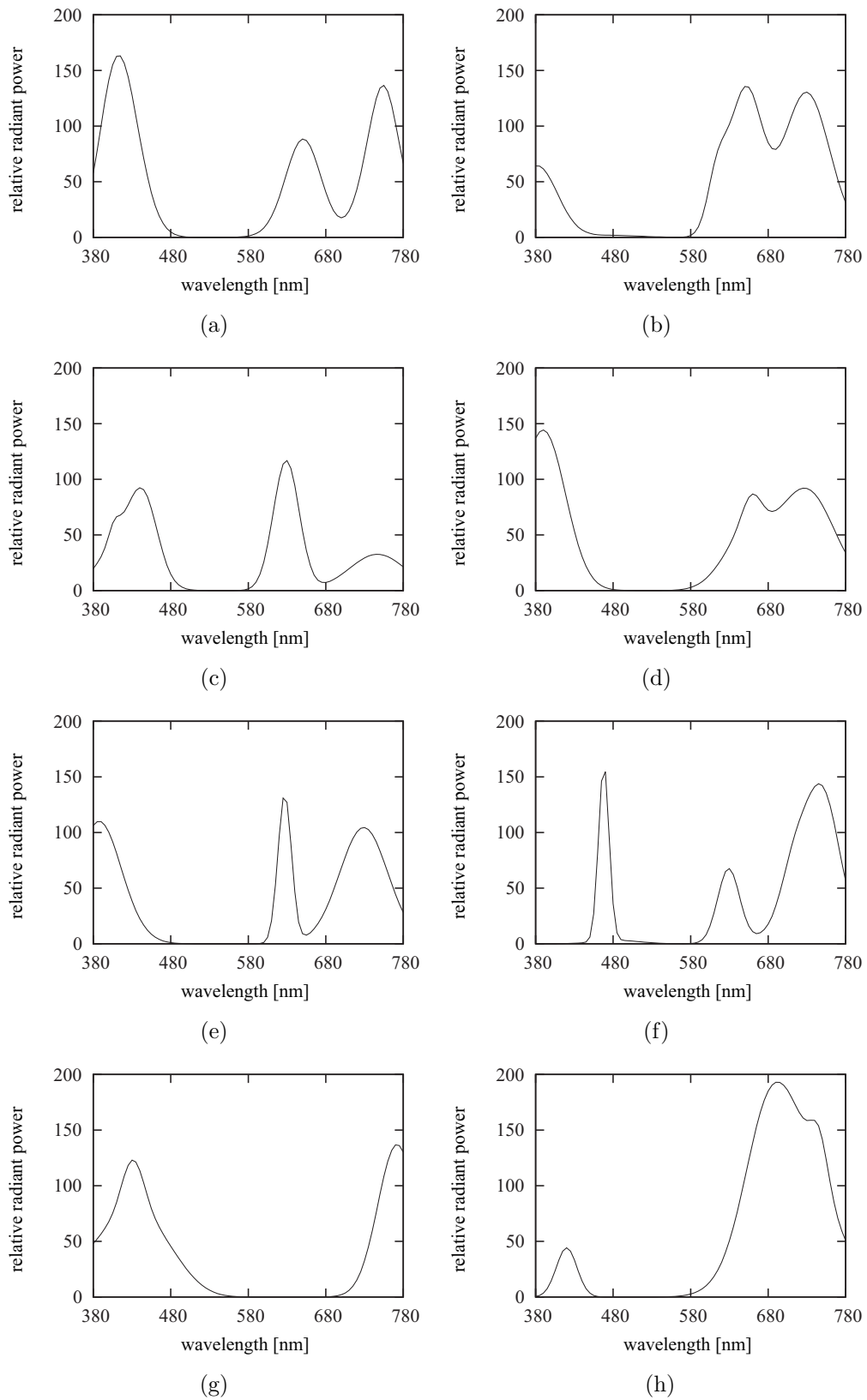


図 5.27 実験画像に対する最適照明の分光スペクトル分布. Flower (a) P, (b) D ; Chart (c) P, (d) D ; Metro (e) P, (f) D ; Nandin (g) P, (h) D

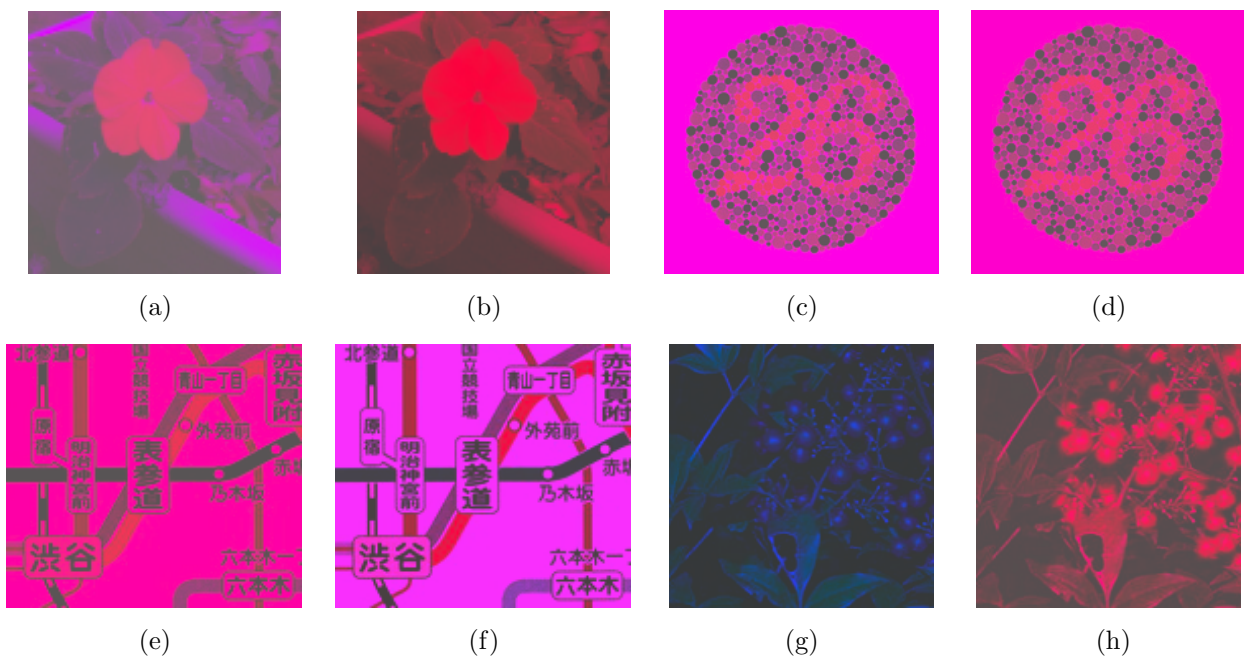


図 5.28 2色覚のための最適照明下での正常色覚者における色の見えのシミュレーション. Flower (a) P, (b) D; Chart (c) P, (d) D; Metro (e) P, (f) D; Nandin (g) P, (h) D

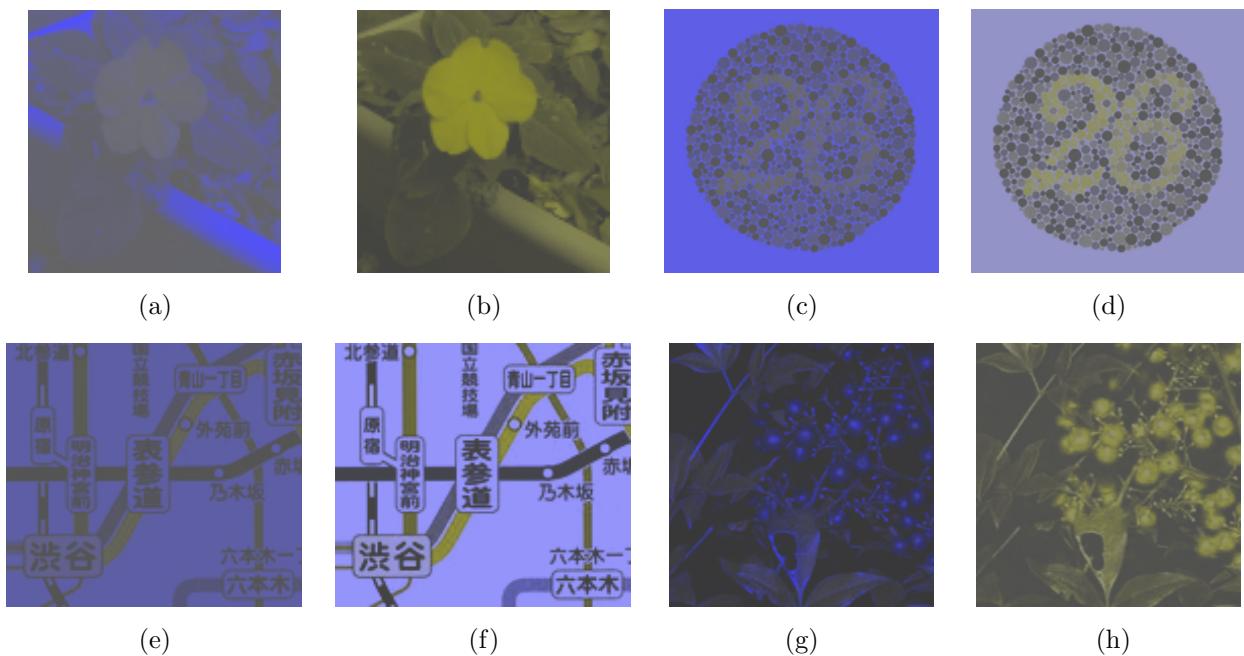


図 5.29 最適照明下での2色覚者における色の見えのシミュレーション. 括弧内の値は  $C$  を表す. Flower (a) P (0.150), (b) D (0.203); Chart (c) P (0.182), (d) D (0.163); Metro (e) P (0.158), (f) D (0.255); Nandin (g) P (0.075), (h) D (0.161)

## 第 6 章

### 結論

本論文では，光源スペクトルに着目し，画像ごとに 2 色覚者に対して最適な照明を自動的に求めるアルゴリズムについて述べた．以下に，各章の内容及び得られた成果について述べる．

第 2 章では，色彩科学の基礎知識について述べた．特に，色覚異常者の視覚特性について述べた．

第 3 章では，提案アルゴリズムについて述べた．まず，局所コントラストを考慮した適合度関数を提案した．次に，適合度関数における各パラメータとその意味について説明した．最後に，提案適合度関数は解析的に最適化できず，数値的な解法が必要なことを述べた．

第 4 章では，最適化アルゴリズムについて述べた．第 3 章で提案した適合度関数の最適化問題に対し，近似最適解を求める手法として，GA を説明した．更に，EM アルゴリズムについて述べた．

第 5 章では，2 色覚者に対し，画像ごとに最適な照明を求める実験を行った．実験において，まず，適合度関数のパラメータ設定について述べた．次に，自由な分光スペクトル空間において最適照明の分光スペクトル分布を求める実験を行い，その最適照明が 2 色覚者の視認性を改善できることをシミュレーション実験により確認した．しかし，得られた分光スペクトルは多くのピークを持ち，実用的ではない．最適照明の分光スペクトルの混合ガウス分布による近似を試みたが，近似照明の適合度が大きく下がることを確認した．最後に，混合ガウス分布を用いた GA による最適化を行い，簡易で有効な分光スペクトルが得られることを確認した．

以上のように，本論文では，2 色覚者に対し，画像ごとに最適な照明を自動的に求めるアルゴリズムについて述べた．得られた最適照明が 2 色覚者の視認性を改善できることをシミュレーション実験により確認した．実験により提案アルゴリズムの有効性を示し，2 色覚者の視認性向上のための照明変換における新たな方法論を確立した．



# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始暖かい激励とご指導を賜りました名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科准教授の田中豪先生に、心からの深く感謝の意を表します。私の拙い論文を何度も読んで頂きご指導頂きました。ありがとうございました。また、名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科の田島譲二名誉教授、中村篤教授、渡邊裕司准教授、宮原一弘学内講師から度々貴重なご意見を頂きました。更に、名古屋工業大学工学部情報工学科の本谷秀堅教授、名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科の中村先生、鎌田直子教授には本博士論文の審査をして頂き、有益なコメントを頂きました。ありがとうございました。心より厚くお礼申し上げます。また、奨学金を御支援して頂いた一般財団法人日本ガイシ留学生基金様、公益財団法人ロータリー米山記念奨学会様、留学生生活を豊かなものにして下さいました名古屋東ロータリクラブ・カウンセラーの今村憲治様に深く感謝しております。共に勉強に励んだ田中研究室の義如さん、安井明代さん、孟夢さん、吉田武史さん、羅瀟さん、閻錦韜さん、イスラムアリさんに感謝致します。

2015年2月28日に母が肝がんで亡くなりました。息子として母のそばにいられなかったことが一番悲しいことでした。私を生んで育ててくれた母に心より感謝しております。最後になりましたが、博士号を取得するまでずっと精神的に支えてくれた妻に感謝しております。ありがとうございました。



## 引用文献

- [1] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami, “Web-page color modification for barrier-free color vision with genetic algorithm,” in *Lecture Notes in Computer Science*, E. Cantú-Paz et al., vol.2724, pp.2134–2146, Springer, Heidelberg, 2003.
- [2] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami, “Preliminary study on color modification for still images to realize barrier-free color vision,” *Proc. IEEE International Conference System, Man and Cybernetics*, vol.1, pp.36–41, The Hague, Netherlands, Oct. 2004.
- [3] 目黒光彦, 高橋千紘, 古閑敏夫, “混同色線理論と色覚モデルに基づくカラー画像からの弁別困難色の検出と弁別しやすい色への変換,” *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.2004, no.102, Oct. 2004.
- [4] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats,” *IEEE Computer Graphics and Applications Magazine*, vol.25, no.3, pp.22–30, June 2005.
- [5] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Re-coloring image for gamuts of lower dimension,” *Computer Graphics Forum*, vol.24, no.3, pp.423–432, Sep. 2005.
- [6] K. Wakita and K. Shimamura, “SmartColor: disambiguation framework for the colorblind,” *Proc. 7th International ACM SIGACCESS Conference Computers and Accessibility*, pp.158–165, Baltimore, USA, Oct. 2005.
- [7] M. Meguro, C. Takahashi, and T. Koga, “Simple color conversion method to perceptible images for color vision deficiencies,” *Proc. SPIE Human Vision and Electronic Imaging XI*, vol.6057, no.36, San Jose, USA, Jan. 2006.
- [8] G. Iaccarino, D. Malandrino, M.D. Percio, and V. Scarano, “Efficient edge-services for colorblind users,” *Proc. ACM Press. 15th International Conference on World Wide Web*, pp.919–920, Edinburgh, Scotland, May 2006. .
- [9] 目黒光彦, 小木曾義文, 大槻昌人, 星野隆太, 古閑敏夫, “インタラクティブ操作に基づく色覚異常者のためのカラー画像の色変換,” *電子情報通信学会技術研究報告 SIS2005-66*, vol.105, no.677, March 2006.
- [10] 星野隆太, 目黒光彦, 古閑敏夫, “組み合わせ最適化に基づく色覚異常者におけるカラー画像中



- の弁別困難色の変換,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2006-76, vol.106, no.575, March 2007.
- [11] J.B. Huang, Y.C. Tseng, S.I. Wu, and S.J. Wang, “Information preserving color transformation for protanopia and deuteranopia,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol.14, no.10, pp.711–714, Oct. 2007.
- [12] C-N. Anagnostopoulos, G. Tsekouras, I. Anagnostopoulos, and C. Kalloniatis, “Intelligent modification for the daltonization process of digitized paintings,” *Proc. 5th International conference on Computer Vision Systems, ICVS 2007, Bielefeld, Germany, March 2007*.
- [13] L. Jefferson and R. Harvey, “An interface to support color blind computer users,” *Proc. ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1535–1538, San Jose, USA, 2007.
- [14] 末竹規哲, 田中 豪, 内野英治, “弁別困難色に対する非線形明度修正法の一提案,” 電子情報通信学会論文誌 (D), vol.J91-D, no.8, pp.2192–2195, Aug. 2008.
- [15] J. B. Huang, S. Y. Wu, and C. S. Chen, “Enhancing color representation for the color vision impaired,” *Proc. Workshop Computer Vision Applications for the Visually Impaired, ECCV 2008, Marseille, France, Oct. 2008*.
- [16] G. R. Kuhn, M. M. Oliveira, and L. A. F. Fernandes, “An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.14, no.6, pp.1747–1754, Dec. 2008.
- [17] J.B. Huang, C.S. Chen, T.C. Jen, and S.J. Wang, “Image recolorization for the colorblind,” *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2009*, pp.1161–1164, Taipei, Taiwan, April 2009.
- [18] G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Lightness modification of color image for protanopia and deuteranopia,” *Optical Review*, vol.17, no.1, pp.14–23, Feb. 2010.
- [19] C-R. Huang, K-C. Chiu, and C-S. Chen, “Key color priority based image recoloring for dichromats,” *Proc. Advances in Multimedia Information Processing, PCM 2010*, vol.6298, pp.637–647, Shanghai, China, Sep. 2010.
- [20] G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Yellow-blue component modification of color image for protanopia or deuteranopia,” *IEICE Transactions on Fundamentals*, vol.E94-A, no.2, pp.884–888, Feb. 2011.
- [21] J.-Y. Jeong, H.-J. Kim, Y.-H. Kim, T.-S. Wang, and S.-J. Ko, “Enhanced re-coloring method with an information preserving property for color-blind person,” *Proc. IEEE International Conference Consumer Electronics, ICCE 2012*, pp.600–601, Las Vegas, USA, Jan. 2012.
- [22] N. Suetake, G. Tanaka, H. Hashii, and E. Uchino, “Simple lightness modification for color vision impaired based on Craik–O’Brien effect,” *Journal of the Franklin Institute* vol.349, no.6, pp.2093–2107, Aug. 2012.

- [23] D.R. Flatla, K. Reinecke, C. Gutwin, and K.Z. Gajos, “SPRWeb: Preserving subjective responses to website colour schemes through automatic recolouring,” Proc. ACM SIGCHI Conference Human Factors in Computing Systems, pp.2069–2078, New York, USA, April/May 2013.
- [24] 永井達哉, 篠田博之, 山口秀樹, “色覚バリアフリー照明に対する光源スペクトルの評価と検証,” 日本色彩学会誌, vol.33, pp.76–77, May 2009.
- [25] 田村繁治, 平賀 隆, “色覚バリアフリー照明に関する基礎的実験,” 日本色彩学会誌, vol.35, pp.106–107, May 2011.
- [26] 田村繁治, “実用的な色覚バリアフリー照明,” 2012 年電子情報通信学会総合大会論文集, no.A-19-18, p.319, March 2012.
- [27] 田村繁治, “色覚バリアフリー照明に関する基礎的実験～W, R-LED を中心に～,” 日本色彩学会誌, vol.36, pp.124–125, May 2012.
- [28] 坂本 隆, 田村繁治, “特殊 LED 光源下における 2 型 2 色覚者の見え : CIELAB を用いた分析,” 日本色彩学会視覚情報基礎研究会, no.3, June 2014.
- [29] 高木幹雄, 下田陽久 (監修), 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [30] 日本色彩学会, 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2011.
- [31] 田島讓二, カラー画像複製論, 丸善株式会社, 東京, 1996.
- [32] 嶋野法之, 色彩工学の基礎と応用, コロナ社, 東京, 2009.
- [33] 岡部正隆, 伊藤 啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション第 1 回, 色覚の原理と色盲のメカニズム,” 細胞工学, vol.21, no.7, pp.733–745, 2002.
- [34] 岡部正隆, 伊藤 啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション第 2 回, 色覚が変化すると, どのように色が見えるのか?,” 細胞工学, vol.21, no.8, pp.909–930, 2002.
- [35] 岡部正隆, 伊藤 啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション第 3 回, すべての人に見やすくするためには, どのように配慮すればよいか,” 細胞工学, vol.21, no.9, pp.1080–1104, 2002.
- [36] D. B. Judd: Handbook of Experimental Psychology, S. S. Stevens, ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.
- [37] G. Wyszecki and W. S. Stiles: Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York, 2000.
- [38] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8>
- [39] R. C. Gonzalez and R. E. Woods: Digital Image Processing, 3th ed., Prentice Hall, New Jersey, 2008.
- [40] R. W. G. Hunt and M. R. Pointer: Measuring Colour, 4th ed., Wiley-Interscience, Chichester, 2011.
- [41] S. S. Deeb, “The molecular basis of variation in human color vision,” Clinical Genetics, vol.67, no.5, pp.369–377, 2005.

- [42] J. Neitz and M. Neitz, “The genetics of normal and defective color vision,” *Vision Research*, vol.51, no.7, pp.633–651, 2011.
- [43] S. Kondo, “A computer simulation of anomalous color vision,” *Color Vision Deficiencies*, Kugler & Ghedini Pub. pp.145–159, 1990.
- [44] H. Brettel, F. Viénot, and J. D. Mollon, “Computerized simulation of color appearance for dichromats,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.14, no.10, pp.2647–2655, Oct. 1997.
- [45] F. Viénot, H. Brettel, and J. D. Mollon, “Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats,” *Color Research and Application*, vol.24, no.4, pp.243–252, Aug. 1999.
- [46] P. Capilla, M. A. Díez-Ajenjo, M. J. Luque, and J. Malo, “Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.21, no.2, pp.176–186, Feb. 2004.
- [47] T. Wachtler, U. Dohrmann, and R. Hertel, “Modeling color percepts of dichromats,” *Vision Research*, vol.44, no.24, pp.2843–2855, Nov. 2004.
- [48] S. Yang, Y. M. Ro, E. K. Wong, and J. -H. Lee, “Quantification and standardized description of color vision deficiency caused by anomalous trichromats—part I simulation and measurement,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol.2008, no.7, pp.1–9, Jan. 2008.
- [49] G. M. Machado, M. M. Oliveira, and L. A. F. Fernandes, “A physiologically-based model for simulation of color vision deficiency,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.15, no.6, pp.1291–1298, Dec. 2009.
- [50] C. E. Rodriguez-Pardo and G. Sharma, “Dichromatic color perception in a two stage model: Testing for cone replacement and cone loss models,” *Proc. IEEE Signal Processing Society, 10th IVMSWP Workshop*, pp.12–17, Ithaca, USA, June 2011.
- [51] D. R. Flatla and C. Gutwin, ““So that’s what you see!” building understanding with personalized simulations of colour vision deficiency,” *Proc. ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pp.167–174, New York, USA, 2012.
- [52] D. B. Judd, “Color perceptions of deuteranopic and protanopic observers,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol.41, no.4, pp.247–271, Oct. 1948.
- [53] M. Alpern, K. Kitahara, and D.H. Krantz, “Perception of colour in unilateral tritanopia,” *The Journal of Physiology*, vol.335, pp.683–697, Feb. 1983.
- [54] V. C. Smith and J. Pokorny, “Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm,” *Vision Research*, vol.15, no.2, pp.161–171, Feb. 1975.
- [55] 内川恵二, 色覚のメカニズム—色を見える仕組み, 朝倉書店, 東京, 1998.
- [56] 坂和正敏, 田中雅博, 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 東京, 1996.

- [57] 小西貞則, 越智義道, 大森裕浩, 計算統計学の計算—ブートストラップ・EM アルゴリズム・MCMC—, 朝倉書店, 東京, 2008.
- [58] D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Professional, Boston, 1989.
- [59] L.T. Maloney and B.A. Wandell, “Color constancy: A method for recovering surface spectral-reflectance,” Journal of the Optical Society of America A, vol.3, no.1, pp.29–33, Jan. 1986.
- [60] ISO/TR 16066, “Standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS),” 2003.



# 発表論文

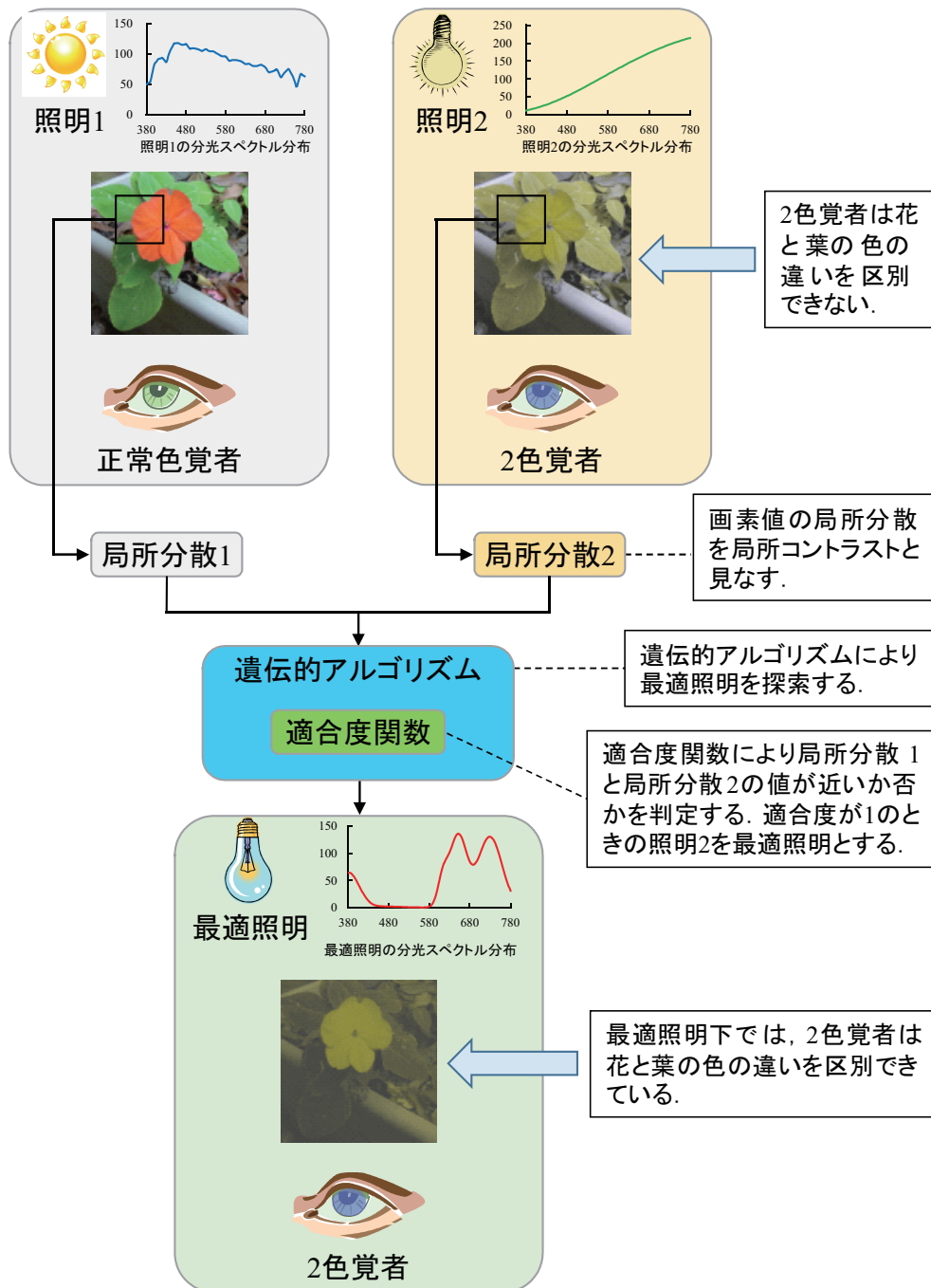
## 【学術雑誌論文】

1. Shi Bao, Go Tanaka, and Johji Tajima, “Fundamental study of illumination transformation for color vision deficiencies,” *Optical Review*, 2015. (in press)

## 【口頭発表】

1. 石 宝, 田中 豪, “遺伝的アルゴリズムによる 2 色覚のための最適光源スペクトルの探索,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2013-70, vol.113, no.467, pp.75–80, March 2014.
2. 石 宝, 田中 豪, 田島譲二, “2 色覚のための照明探索アルゴリズムにおける適合度関数の一検討,” 第 20 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.IS1-22-1–IS1-22-4, June 2014.
3. Shi Bao, Go Tanaka, and Johji Tajima, “Fundamental study of illumination transformation for protanopia and deuteranopia,” *Proceedings of 2014 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia*, pp.36–41, Ho Chi Minh City, Vietnam, Oct. 2014.









# 用語集

1. 可視光：ヒトが見ることのできる光のことである。可視光の波長は約 380nm から約 780nm である。可視光における短波長から長波長には、紫、藍、青、緑、黄、橙、赤の色が分布している。
2. 分光反射率：各波長域において、物体の表面に入射した光の強度に対して、物体の吸収や散乱により再び空気に出射する光の強度が占める割合である。物体により分光反射率が異なる。物体における色の物理的な性質は分光反射率によりほぼ決まる。
3. 視細胞（錐体・杆体）：光を感じる細胞である。視細胞には錐体と杆体の 2 種類の細胞がある。錐体細胞は明所で機能し、杆体細胞は暗所で機能する。色の知覚に対して錐体が機能する。視細胞において、約 95% が杆体であり、残りの 5% が錐体である。錐体には、それぞれ長波長、中波長、短波長の光を知覚する L 錐体、M 錐体、S 錐体がある。
4. 正常色覚：L, M, S 錐体が正常な機能を持つ色覚のことをいう。正常 3 色覚ともいう。
5. 色覚異常：L, M, S 錐体の内、1 種類以上の錐体が異常あるいは欠落した色覚のことをいう。L, M, S 錐体において、1 種類以上の錐体に異常がある場合、異常 3 色覚と呼ぶ。異常 3 色覚において、L 錐体が異常の場合、1 型 3 色覚と呼ぶ。同様に M 錐体が異常の場合 2 型 3 色覚と呼び、S 錐体が異常の場合 3 型 3 色覚と呼ぶ。3 種類錐体の中、いずれ一つが欠落している場合、2 色覚という。2 色覚において、欠落した錐体が L, M, S 錐体の場合、それぞれ 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚、3 型 2 色覚という。
6. 標準の光：物体の色を測定するために、国際照明委員会（CIE）が定めた光源をいう。測色用の光としてよく知られているのは、CIE が 1931 年に定めた標準 A, B, C 光源と 1964 年に定めた標準 D 光源の  $D_{55}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{75}$  である。CIE の標準 D 光源は、米国、カナダ、英国で自然の昼光を測定し、標準化した光である。 $D_{65}$  は、色温度が 6,500 K の標準 D 光源を表す。
7. 分光スペクトル分布：光源は単色放射の組み合わせの連続スペクトルからなる。光源を単色ごとに分光できる場合、波長あたりの放射量を現したものが分光スペクトル分布である。
8. 色再現：オリジナル画像からカラーマッチングにより再現画像を作成することである。カラーマッチングには、分光特性が一致することを目標とした分光カラーマッチングと三刺激値の一致を目標とした条件等色マッチングがある。
9. 三刺激値：ある単色光刺激と 3 種類の単色光の組み合わせにより得られる光の刺激が同じになることが知られている。その同じになる 3 種類の単色光により等色関数を得ることができる。この等色関数を用いて、ある色刺激関数を評価した値を三刺激値と呼ぶ。ある二つの色

刺激に対し，三刺激値が等しいか否かによってヒトに同じに見えるか否かを予測できる。

10. 色差：色の違いの度合を数値的に表したものである。一般的に色差としてよく用いられるものは CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色空間における距離である。 $L^*a^*b^*$  色空間における 2 色の距離は，ヒトが感じるその 2 色の差とほぼ対応する。色差が大きいほど，ヒトには違う色に見える。
11. 2 色覚モデル：2 色覚における色の見えを正常色覚者に見せるためのシミュレーションモデルである。2 色覚モデルの多くは片目 2 色覚者の実験に基づいたものである。片目 2 色覚者は片目が正常色覚であり，もう片方の目が 2 色覚を持つ人である。
12. 遺伝的アルゴリズム (GA)：遺伝的アルゴリズムは，自然界に倣ったアルゴリズムである。環境に適した個体がたくさんの子供を持ち，環境に適していない個体が淘汰される。遺伝的アルゴリズムにおいて，各個体が環境に適しているか否かを評価するために，適合度関数を定義する必要がある。求めた適合度に基づいて，個体を残すか捨てるかを定める。
13. EM アルゴリズム：不完全データに対し，完全データを求めるためのアルゴリズムである。E は expectation を意味し，M は maximization を意味する。E ステップでは，パラメータを固定し，期待値を求める。M ステップでは，期待値を固定し，パラメータを計算する。
14. 混合ガウス分布：複数のガウス分布からなる分布である。一つのガウス分布は単峰性であるが，混合ガウス分布はより複雑なデータを表現できる。