

2022 年度修士論文

さまざまな色覚特性に対する
スペクトルを考慮した色再現手法
Reproduction of Color Vision Deficiency
Considering Spectrum

広島大学先進理工系科学研究科 情報科学プログラム
ビジュアル情報学研究室

高橋 晴矢
Haruya Takahashi

指導教員	金田 和文	教授
	檜垣 徹	准教授
	Bisser Raytchev	准教授

2023 年 2 月 7 日

目次

第 1 章 序論	2
1.1 節 視覚と錐体	2
1.2 節 Color Vision Deficiency	2
1.3 節 表色系の変換	3
1.3.1 項 表色系	3
1.3.2 項 スペクトルから LMS 表色系または XYZ 表色系への変換	4
1.3.3 項 XYZ 表色系と sRGB 表色系の相互変換	5
1.3.4 項 XYZ 表色系と LMS 表色系の相互変換	5
1.3.5 項 Lab 表色系と XYZ 表色系の相互変換	6
1.4 節 本論文の構成	6
第 2 章 関連研究	8
2.1 節 CVD の色再現手法	8
2.2 節 段階説	8
第 3 章 提案手法	10
3.1 節 色再現ネットワーク	10
3.2 節 色再現ネットワークの重みの決定	11
3.3 節 最適化手法 CMA-ES	12
第 4 章 実験と結果	14
4.1 節 色再現ネットワークの重みの算出	14
4.2 節 CVD の症状の違いによる色再現	15
4.3 節 メタメリズムを満たす異なるスペクトルの色再現	17
4.4 節 他のスペクトル画像の適用例	17
第 5 章 結論	22
付録 A XYZ 三刺激値と LMS 値の関係	23
謝辞	24

概要

目は、光を唯一直接受け取ることができる器官である。人が外部から取得する情報のほとんどは目からの情報である。外部から情報を取得する役割として、人の目は他の器官と比べて最も重要な器官であると言える。人は、目の底にある 3 種類の錐体の信号により色を認識している。3 種類の錐体は、L 錐体、M 錐体、S 錐体と呼ばれており、それぞれ長波長、中波長、短波長に最大感度を持っている。つまり L 錐体、M 錐体、S 錐体の応答を基に私たちはさまざまな色を知覚している。しかし、一部の錐体の働きが弱かったり機能しなかったりする症状 Color Vision Deficiency (CVD) の場合、正常な視覚特性を持っている人と比べ区別できる色が少なくなり日常生活を送る上で不便を強いることになる。最近では CVD のような症状を持つ人々への理解が深まり、標識やゲームの色表現に対して CVD を考慮した色の選択や設定を設けるという配慮がされるようになってきている。しかし、正確に CVD の色覚を再現することはとても困難であり、課題となっている。

従来法では、RGB 値から線形変換により CVD の色再現を行なっている。そのため、正確な色の再現が行えていない可能性がある。なぜなら、錐体は光のスペクトルに基づいて応答しているからである。また、従来法は主に特定の色覚に対する色再現に特化しており、一つの手法でさまざまな CVD に対応できない。本論文では、段階説を基に構成したスペクトル入力による色再現ネットワークを構築し、さまざまな CVD 症状の色再現に関して研究を行った成果をまとめたものである。

本論文は次の構成になっている。第 1 章では序論として、本研究の目的と Color Vision Deficiency(CVD)などを説明する。第 2 章では、これまでの研究を紹介し本論文の位置付けを明らかにする。第 3 章では、段階説を基にした色再現ネットワークの提案とネットワークの調整について述べる。これは CVD の色覚を再現するための手法である。CVD の色覚は症状によって大きく異なる。具体的には機能の低下した錐体の種類や低下の程度によって異なる。提案手法では、人が色を認識するプロセスをまとめた段階説に基づいてモデル化したネットワークを構築し、症状の違いを考慮して色再現ネットワークを調整する手法を提案している。さらに、入力として光のスペクトルを用いるため従来法では同色と知覚されるようなメタメリズムを満たす色に対して提案手法では違いが生じるという結果を得た。第 4 章では、実験と結果をまとめ、最後に第 5 章で、結論と今後の課題を述べる。

第1章 序論

Introduction

第 1 章 序論

本研究では、段階説に基づいてスペクトルを入力とした色再現ネットワークを構築し、さまざまな CVD 症状の色再現を可能とする手法を開発することが目的である。段階説に基づく色再現ネットワークの重みを CVD の症状に合わせて調整することで、さまざまな CVD の症状に対する色再現を実現する。そして、光のスペクトルを入力とすることで、より現実に近い近くプロセスに従って色再現することができる。

本章では、まず視覚と錐体について説明したのちに各種 CVD 症状について説明する。そして、本研究で扱う表色系とその変換について説明する。本章の最後に本論文の構成について述べる。

1.1 節 視覚と錐体

目は、人の感覚器官の中で唯一光を直接受け取ることができる器官である。人が外部から得る情報の多くを目に頼っている。そのため、我々は生きる上で視覚情報が非常に重要である。そこで、本節では眼底の網膜に存在している錐体について説明する。

錐体は、網膜の最も外側にある。錐体には、光を電気信号に変換することができる器官を持っている。錐体は 3 種類存在し、それぞれ異なる波長に感度を持っている (図 1.3 参照)。これらは L 錐体、M 錐体、S 錐体と呼ばれており、それぞれ長波長、中波長、短波長に感度のピークを持っている。これら 3 つの錐体の応答を基に、色を知覚することができる。この L 錐体、M 錐体、S 錐体の応答から色を認識する性質をもとに、1.3.1 項で説明する LMS 表色系が考案された。

1.2 節 Color Vision Deficiency

1.1 節で紹介したように、人は L 錐体、M 錐体、S 錐体から得た電気信号をもとに色を知覚している。しかし、世の中には一部の錐体の働きが弱いまたは欠落することがある。そのような症状を Color Vision Deficiency (CVD) と呼び、CVD を持つ人は世界に数億人ほどいると言われている。最近では、CVD への認知が高まりゲームや標識などに対して CVD を考慮したカラーユニバーサルデザインが行われるようになってきている。

CVD には、働いていない錐体の個数とどの錐体が原因かで分類分けがされる。1 つの錐体の働きが低下している場合は、3 色覚に分類される。また、1 つの錐体が欠落しているときは 2 色覚に分類される。さらに細かく分類するときは、原因となる錐体で次のように分類する。L 錐体が原因のときは 1 型、M 錐体が原因のときは 2 型、S 錐体が原因のときは 3 型と分類される (表 1.1 参照)。

表 1.1 CVD の分類

錐体		L	M	S
機能	低下	3 色覚 1 型	3 色覚 2 型	3 色覚 3 型
	欠落	2 色覚 1 型	2 色覚 2 型	2 色覚 3 型

1.3 節 表色系の変換

本節では, 表色系を説明する. その後に各種表色系への変換を紹介する.

1.3.1 項 表色系

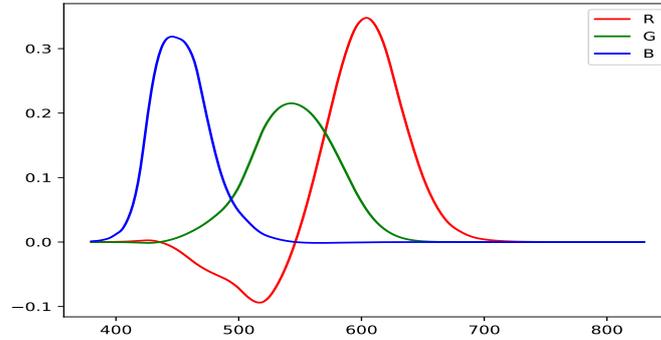


図 1.1 CIE-RGB 等色関数

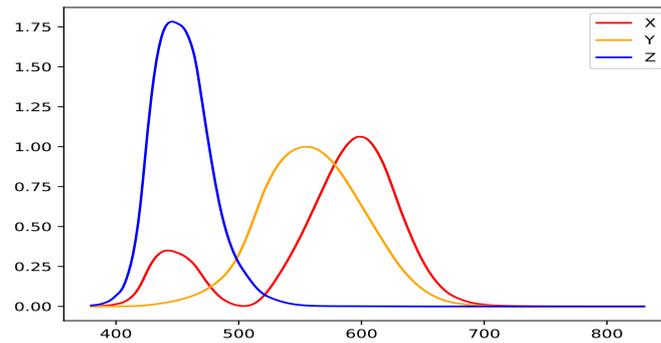


図 1.2 CIE-XYZ 等色関数

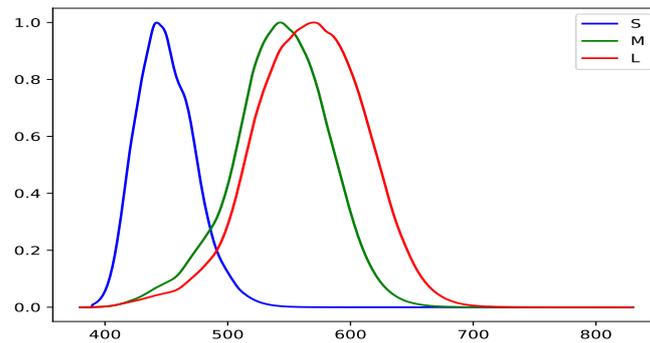


図 1.3 LMS 応答関数

色を定量的に表現する体系を表色系と呼ぶ. 表色系には, 人が知覚した色を記号や色票などで定量的に扱う顕色系と, 実験に基づいた色を心理物理量として定量的に扱う混色系がある. 本節では,

本研究で中心に扱う表色系を紹介する [1].

■**CIE-RGB 表色系** あらゆる色は, R, G, B の 3 色を用いて表現することができる. これをもとにそれぞれの波長の色を表現するために必要な R, G, B の比率を求め, 図 1.1 に示す等色関数を導出した. 三刺激値 R, G, B を求める際には, 等色関数と分光分布と掛け合わせて可視長範囲で積分することで求めることができる [2].

■**CIE-XYZ 表色系** XYZ 表色系は, RGB 等色関数の負の領域が出現する不便さを改良するために, 線形変換により導出された表色系である. 図 1.2 を見てわかるように, 等色関数の全ての値が正になっている. また, XYZ 表色系の Y は輝度値情報を全て集約している [2].

■**CIE-L*a*b*表色系** 色度座標間の距離と人の知覚はかなり異なっている. この差をできるだけなくすために, CIE-XYZ 表色系の三刺激値をもとに CIE 均等色空間の一つである CIE-L*a*b*表色系 (以下簡略化して Lab 表色系と示す) が規定された. これにより, 異なる 2 つの色がどれほど似ているか, また異なっているかの数値化が容易になった [2].

■**sRGB 表色系** カラー画像は, 3 種類のカラーフィルターを通して測定した三刺激値で構成されている. このカラーフィルターは, 撮像素子を製造するときに組み込まれるため, 製造されるメーカーによって異なる可能性がある. 同様に, カラー画像を表示するディスプレイでも, 表現できる 3 原色が違う可能性がある. そのためデバイスに依存しない色空間, 独立色空間が必要になる. 独立色空間の一つとして規定されたのが sRGB 表色系である [1].

■**LMS 表色系** 従来の CIE 表色系に用いられる等色関数は, 錐体の分光感度とは一致していない. 特に短波長域における誤差が大きい. 現在では, 錐体の分光感度の測定が可能となり測定データも集まるようになってきている. 錐体分光感度を図 1.3 示す. 最近では, 錐体分光感度関数を用いる方がより正確に色を表現できると考えられる [2].

1.3.2 項 スペクトルから LMS 表色系または XYZ 表色系への変換

光のスペクトル分布から LMS 値に変換する際には, 次式に示すようにその波長ごとの輝度 $I(\lambda)$ と各錐体の応答関数との積分計算を行う.

$$L = \int_{\Lambda} \bar{l}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

$$M = \int_{\Lambda} \bar{m}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

$$S = \int_{\Lambda} \bar{s}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

ここで, $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ は, 錐体の応答関数 [CIE, 2006] を表す. Λ は, 可視光の波長範囲である.

光のスペクトル分布から XYZ 三刺激値 [CIE, 1931] への変換する際は, LMS 値への変換と同様に, 次式で表現される.

$$X = \frac{1}{k} \int_{\Lambda} \bar{X}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.4)$$

$$Y = \frac{1}{k} \int_{\Lambda} \bar{Y}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.5)$$

$$Z = \frac{1}{k} \int_{\Lambda} \bar{Z}(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1.6)$$

ここで, $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$, $\bar{Z}(\lambda)$ は, XYZ 等色関数を表す. k は, ホワイトポイントにおいて Y が 100 になるように正規化するための定数である.

1.3.3 項 XYZ 表色系と sRGB 表色系の相互変換

XYZ 表色系から sRGB 表色系 [IEC, 1998] への変換は次式に示す線形変換を行う.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{XYZ \text{ to } RGB} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

ここで, 変換行列は $M_{XYZ \text{ to } RGB}$ は次に表す 3×3 の行列である.

$$M_{XYZ \text{ to } RGB} = \begin{bmatrix} 3.24004542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

sRGB 表色系から XYZ 表色系への変換は式 (1.7) の逆変換を行う.

1.3.4 項 XYZ 表色系と LMS 表色系の相互変換

LMS 表色系 [CIE, 2006] から XYZ 表色系への変換は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_{LMS \text{ to } XYZ} \begin{bmatrix} L \\ M \\ Z \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

ここで, 変換行列 $M_{LMS \text{ to } XYZ}$ は次に表す 3×3 の行列 [3] である.

$$M_{LMS \text{ to } XYZ} = \begin{bmatrix} 1.947355469 & -1.4144512 & 0.36476327 \\ 0.68990272 & 0.34832189 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.93485343 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

XYZ 表色系から LMS 表色系への変換は, 式 (1.9) の逆変換を行う.

1.3.5 項 Lab 表色系と XYZ 表色系の相互変換

XYZ 表色系と Lab 表色系は次式を用いることで、互いに変換できる。

1. XYZ から Lab への変換

$$\begin{aligned} L &= 116 f(Y/Y_w) - 16 \\ a &= 500 (f(X/X_w) - f(Y/Y_w)) \\ b &= 200 (f(Y/Y_w) - f(Z/Z_w)) \end{aligned} \quad (1.11)$$

ここで,

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & (t > (6/29)^3) \\ ((29/3)^3 t + 16)/116 & (t \leq (6/29)^3) \end{cases} \quad (1.12)$$

2. Lab から XYZ への変換

$$X = \begin{cases} f_x^3 X_w & (f_x > 6/29) \\ (3/29)^3 (116 f_x - 16) X_w & (f_x \leq 6/29) \end{cases} \quad (1.13)$$

$$Y = \begin{cases} f_y^3 Y_w & (f_y > 6/29) \\ (3/29)^3 (116 f_y - 16) Y_w & (f_y \leq 6/29) \end{cases} \quad (1.14)$$

$$Z = \begin{cases} f_z^3 Z_w & (f_z > 6/29) \\ (3/29)^3 (116 f_z - 16) Z_w & (f_z \leq 6/29) \end{cases} \quad (1.15)$$

ここで,

$$\begin{cases} f_y = (L + 16)/116 \\ f_x = f_y + a/500 \\ f_z = f_y - b/200 \end{cases} \quad (1.16)$$

また, X_w, Y_w, Z_w は, ホワイトポイントの XYZ 三刺激値である。

1.4 節 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。第 2 章では本研究について関連する従来法と段階説について説明する。第 3 章では提案する色再現ネットワークの構成法や重みの調整方法について詳述する。さらに, 第 4 章では実験と結果についてまとめる。最後に第 5 章で本論文をまとめる。

第2章 関連研究

Related Work

第 2 章 関連研究

2.1 節 CVD の色再現手法

Brettel ら [4] は LMS 色空間で 2 色覚性の CVD の色の知覚をシミュレートする方法を提案している。2 色覚の色域が黄色, 青色, 無彩色などの一般的な色を含む反平面によって構成されると仮定した。

F. Vie'not ら [5] は, 2 色覚性の CVD 色覚を再現する線形変換の手法を提案した。F. Vie'not らの手法では, 健常者の LMS 値を 2 色覚性の CVD 患者の LMS 値に変換行列を用いて変換し, CVD の色知覚を再現している。この方法では, 2 色覚第 1 型, 第 2 型では黒 $(0, 0, 0)$, 白 (L_w, M_w, S_w) , 青 (L_b, M_b, S_b) の 3 色が健常者と同じ色を知覚していると仮定し, 3 次元空間において, これら 3 色を表す 3 点を通る平面の方程式を解くことで変換行列を求めている。

Machado [6] らは, 2 段階説を適用し, 3 色覚性と 2 色覚性の CVD 色覚へ線形変換する行列を算出すること色再現を提案した。3 色覚性の CVD 視覚特性が正常色覚特性から 2 色覚性の CVD 視覚特性の間でシフトする [7] ことを基にそれぞれの症状に対して変換行列を求めている。本研究では, F. Vie'not ら [5] が変換行列を求める考え方を基に色再現ネットワークの重みを調整する。

CVD は一部の錐体の働きが弱いまたは, 欠落することで生じるため, 知覚できる色の総数が少なくなる。その結果, コントラストの損失が生じる。CVD のための再着色に関する研究は, 区別できなくなった色を区別できる色に再着色することでコントラストを強調することが目的である。しかし, コントラストの強調にのみ焦点をあてるとオリジナル画像との差異が大きくなってしまい観察者に不自然な印象を与えてしまうことがある。最近では, コントラストの強調と自然さの保存両方に着目した研究 [8] が行われている。

2.2 節 段階説

段階説は, LMS 表色系と反対色表色系で構成される [9]。

LMS 表色系は, L 錐体, M 錐体, S 錐体の応答をもとに考案された表色系である [10]。人の色の知覚は, この 3 種類の錐体から得た応答を基にしているという考えである。

反対色表色系は, Hering によって導入され [11], Hurvich ら [12] により実験的に検証された。この表色系は, 赤-緑, 青-黄, 明-暗の反対色で構成されている。人の色の知覚は, 反対色をもとに色を知覚しているという考え方である。

これら 2 つの表色系の特徴を組み合わせた考え方が段階説 [9] である。このモデルの 1 段階目では, スペクトル光は LMS 表色系で表される。そこから出た信号の一部が赤, 黄の信号を作成する。2 段階目では, 1 段階目の出力と混ざり合った信号を基に反対色表色系を構成する。

第3章 提案手法

Proposed

第 3 章 提案手法

段階説は、視覚の機能的特性と形態学的特性に基づいたモデルである。実際に、人の視覚では錐体の段階では LMS 表色系でモデル化される処理をし、網膜神経節細胞の段階では Lab 表色系でモデル化される処理がされることが実証されている [13]。

光が目に入射し色覚が発生するまでの処理過程がブラックボックスであれば深層学習を利用する方法も考えられる。しかし、段階説のが視覚のメカニズムを説明する極めて有力な考え方であるため、本研究ではさまざまな視覚特性をシミュレートするために、段階説を利用し色覚プロセスに従った色再現ネットワークを構築する。

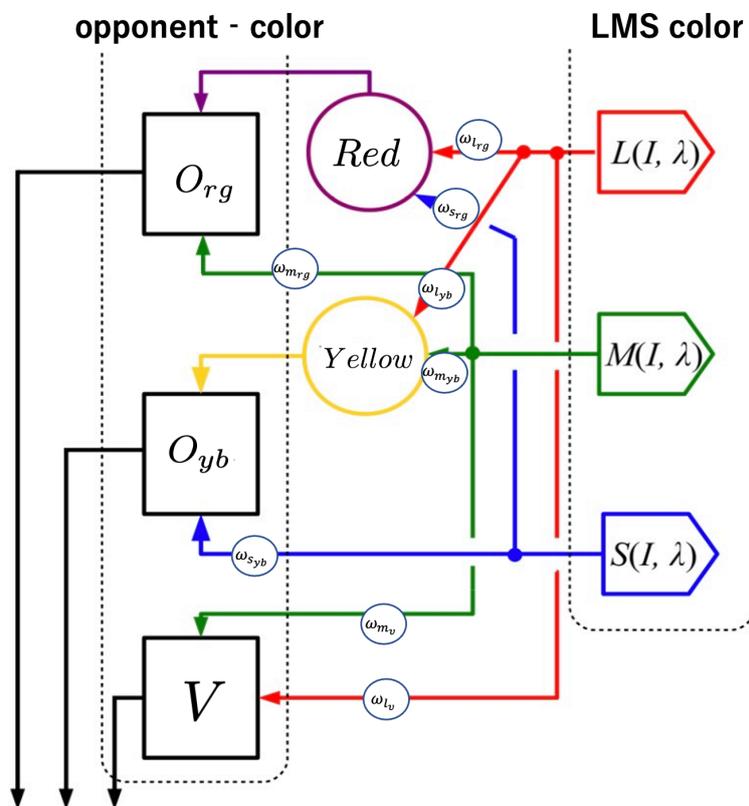


図 3.1 色再現ネットワーク

3.1 節 色再現ネットワーク

提案手法における色再現ネットワークを図 3.1 に示す。ネットワークは 3 つの錐体 (L, M, S) に加え、8 つの重み ω と、5 つのノード ($Red, Yellow, O_{rg}, O_{yb}, V$) から構成される。

前述したように色再現のネットワークの各ノードでは、次式を用いて信号値が出力される。

- $Red, Yellow$ ノードの出力信号

$Red, Yellow$ ノードでは、錐体からの信号の結合を表現するため本研究では入力値の重み付

き和で各ノードからの出力信号を決定する.

$$R = \omega_{l_{rg}} L + \omega_{s_{rg}} S \quad (3.1)$$

$$Y = \omega_{l_{yb}} L + \omega_{m_{yb}} M \quad (3.2)$$

- O_{rg}, O_{yb}, V ノードの出力信号

O_{rg}, O_{yb}, V ノードでは, 人が色を認識する部分に関連した部分である. そのため本研究では, シグモイド関数を用いてノードからの出力信号を決定する.

$$O_{rg} = \text{Sigmoid}(R - \omega_{m_{rg}} M, -127, 128) \quad (3.3)$$

$$O_{yb} = \text{Sigmoid}(Y - \omega_{s_{yb}} S, -127, 128) \quad (3.4)$$

$$V = \text{Sigmoid}(\omega_{l_v} L + \omega_{m_v} M, 0, 100) \quad (3.5)$$

ここで, L, M, S , は光の入力スペクトルから式 (1.1), 式 (1.2), 式 (1.3) をそれぞれ用いて計算された LMS 三刺激値である. 関数 $\text{Sigmoid}(i, \theta_{min}, \theta_{max})$ は, 出力値の最小値が θ_{min} , 最大値が θ_{max} となるようにシグモイド関数をベースに作成した以下の関数である.

$$\text{Sigmoid}(i, \theta_{min}, \theta_{max}) = \begin{cases} 2 \left(\frac{1}{1 + \exp(-i/\theta_{max})} - \frac{1}{2} \right) \theta_{max} & (i \geq 0) \\ 2 \left(\frac{1}{1 + \exp(-i/\theta_{min})} - \frac{1}{2} \right) \theta_{min} & (i < 0) \end{cases} \quad (3.6)$$

ここで, $i = 0$ において関数が 1 次微分連続となるように θ_{min} と θ_{max} を設定する.

3.2 節 色再現ネットワークの重みの決定

提案する色再現ネットワークの 8 つの重みは以下の手順で決定する.

初めに, 3 つの錐体が正常に働いている健常者モデルの重みを最適化手法 CMA-ES [14] を用いて決定する. 最適化手法 CMA-ES については, 次節で詳述する.

最適化の際の目的関数 \mathcal{O} を次式に示す.

$$\mathcal{O} = \sqrt{\sum_C \frac{(L_C - L_C^{gtc})^2 + (a_C - a_C^{gtc})^2 + (b_C - b_C^{gtc})^2}{3n(C)}} \quad (3.7)$$

ここで, $n(C)$ は集合 C の大きさを表す. 健常者の場合は, $C = \{K, W, B, G, R\}$ (K : black, W : white, B : blue, G : green, R : red) とする. $L_C^{gtc}, a_C^{gtc}, b_C^{gtc}$ は, 色 C の Lab 表色系での値を表す. L_C, a_C, b_C は, 提案している色再現ネットワークの出力値 (O_{rg}, O_{yb}, V) を表している.

次に, 2 色覚性の CVD の場合は, 集合 $C = \{K, W, B\}$ とし, 同様に最適化問題を解くことで 5 つの重みを決定する. ここで, 残り 3 つの重みについては, L 錐体の応答がない (1 型) 場合は, $\omega_{l_{rg}} = \omega_{l_{yb}} = \omega_{l_v} = 0$ と設定する. M 錐体の応答がない (2 型) 場合は, $\omega_{m_{rg}} = \omega_{m_{yb}} = \omega_{m_v} = 0$ と設定

する.

最後に, 3色覚性の CVD を表現するための重みを決定する. 3色覚性 CVD は, 2色覚性の CVD から健常者の間で連続的に変化する. 提案手法では, 3色覚性 CVD の重み ω^{tri} を 2色覚性 CVD の重み ω^{di} と健常者の重み ω^n を用いて線形的に変化させる.

$$\omega_J^{tri} = (1 - k)\omega_J^{di} + k\omega_J^n, \quad (3.8)$$

ここで, k ($0 < k < 1$) は, 3色覚性の CVD の症状の度合を表すパラメータである. $k=0$ の時は, 2色覚性の CVD を表し, $k=1$ の時は, 健常者を表す. J は, 重みの添字集合を表し, $J = \{l_{rg}, m_{rg}, s_{rg}, l_{yb}, m_{yb}, s_{yb}, l_v, m_v\}$ とする.

3.3 節 最適化手法 CMA-ES

CMA-ES [14] は共分散行列適応進化戦略 (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) の略であり, 最適化手法の一つである. この手法は, 世代ごとに多変数量の正規分布を基に個体のサンプルをとる. ここで, 変数間の依存関係は共分散により表現される. CMA とは共分散行列適応を意味しており, 世代ごとに共分散行列をサンプルされた上位個体を基に値が収束するまでまたは, 決められた世代数が過ぎるまで更新を続ける.

他の進化戦略と比べ設定するパラメータが少なく, またノイズが含まれているデータを想定し開発された手法である. さらに n 次元の共分散行列の更新が $O(n)$ で計算されるため計算時間の面でも比較的高速に最適解を求めることができる.

本研究で扱う最適化問題の解空間が, どのような特徴があるのかわからないため, 出来るだけ幅広い空間から解を探索でき, また局所解に陥り難い手法として, 本研究では最適化手法として CMA-ES を利用した.

第4章 実験と結果

Experiment and Result

表 4.1 K,W,B,G,R の各表色系での値

色 C	$K : black$	$W : white$	$B : Blue$	$G : Green$	$R : Red$
$sRGB$	(0.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.00, 0.00, 1.00)	(0.00, 1.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)
XYZ	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.95, 1.00, 1.09)	(0.18, 0.07, 0.95)	(0.36, 0.72, 0.12)	(0.41, 0.21, 0.02)
$L^{gct} a^{gct} b^{gct}$	(0.00, 0.00, 0.00)	(8.99, 0.00, 0.00)	(0.65, 4.58, -12.47)	(6.46, -13.19, 9.43)	(1.92, 8.62, 3.04)
LMS	(0.00, 0.00, 0.00)	(113.06, 96.79, 62.86)	(6.93, 9.43, 54.86)	(76.20, 78.44, 6.88)	(29.93, 8.92, 1.12)

表 4.2 健常者と 2 色覚性の場合の色再現ネットワークの重み

重み	$\omega_{l_{rg}}$	$\omega_{m_{rg}}$	$\omega_{s_{rg}}$	$\omega_{l_{yb}}$	$\omega_{m_{yb}}$	$\omega_{s_{yb}}$	ω_{l_v}	ω_{m_v}
健常者	0.9633	1.3248	0.3127	0.1919	0.1008	0.5109	0.1048	0.0692
2 色覚 1 型	0	0.1210	0.1887	0	0.3332	0.5195	0	0.1858
2 色覚 2 型	-0.0381	0	0.0713	0.2725	0	0.4905	0.1596	0

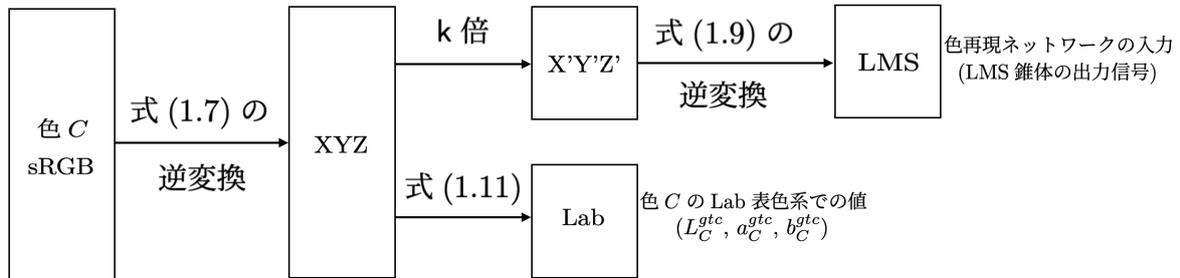


図 4.1 目的関数における色 C の設定

第 4 章 実験と結果

この節では、まず初めに重みの算出について説明をする。それから、それぞれの CVD に対応した色再現を行う。その後、メタメリズムを満たすスペクトルを入力にした場合の色再現を行う。最後に、屋外景観などの画像への適用例を示す。

4.1 節 色再現ネットワークの重みの算出

色再現ネットワークの重みを決定するための最適化問題における目的関数の計算において、色 C に対する Lab 表色系での値と色再現ネットワークへの入力値は次のように設定した。

図 4.1 に色 C の表色系の変換の流れを示す。色 C の $sRGB$ 表色系での値を基に 1.3 節で示した変換を用いて、 Lab 表色系と LMS 表色系での値を計算することで、目的関数の真値 ($L_C^{gct}, a_C^{gct}, b_C^{gct}$) と色再現ネットワークの入力値 (L 錐体, M 錐体, S 錐体の各信号値) を求め、具体的な算出方法は以下の通りである。

色 C の Lab 表色系での値を求めるために, sRGB 表色系での RGB 値を式 (1.7) の逆変換により XYZ 三刺激値に変換する. その後, XYZ 三刺激値を式 (1.11) を用いて Lab 表色系に変換する. 変換された Lab 値を式 (3.7) に示す目的関数の $(L_C^{gtc}, a_C^{gtc}, b_C^{gtc})$ とする.

色再現ネットワークの入力である色 C のスペクトルを sRGB 表色系での RGB 値から求めることは困難である. そのため, 色 C のスペクトルを求める代わりに色 C に対する各錐体からの出力である LMS 値を求め, それを用いて色再現ネットワークの出力値 (L_C, a_C, b_C) を求める. ここで, スペクトルから XYZ 三刺激値を求める場合は, 式 (1.4) から式 (1.6) に示すように係数 k で正規化を行っている. 一方, LMS 値を求める際には, 式 (1.1) から式 (1.3) に示すように, 正規化が行われていない. このことを考慮して, LMS 値を求める際には, 正規化をしない XYZ 三刺激値を用いる (付録 A 参照). 具体的に LMS 値を求める手順は, 図 4.1 に示すように, sRGB 表色系での RGB 値を XYZ 三刺激値に変換し, その XYZ 三刺激値を係数 k 倍する. そして, 式 (1.9) の逆変換を用いて LMS 値に変換する. この LMS 値を, 色再現ネットワーク (図 3.1 参照) における L, M, S の出力値として用いて色再現ネットワークの出力値を計算する. すなわち, 式 (3.1) から式 (3.5) を用いて, 色再現ネットワークの出力 (O_{rg}, O_{yb}, V) を計算し, 式 (3.7) に示す目的関数の (L_C, a_C, b_C) にする.

上述の手順により求めた色 C の各表色系での値を表 4.1 に示す. これらの値を用いて, 色再現ネットワークの出力値 (L_C, a_C, b_C) が真値 $(L_C^{gtc}, a_C^{gtc}, b_C^{gtc})$ と同じ値になるように最適化手法 CMA-ES を用いて重みを計算する.

最適化手法を用いて健常者と 2 色覚 1 型, 2 色覚 2 型の重みを求めた結果を表 4.2 に示す. 1 型では L 錐体, 2 型では M 錐体からの入力値がそれぞれ 0 となるため, その錐体の出力部の重みを 0 に設定する. これらの結果を用いて, 3 色覚性 CVD の重みを式 (3.8) により決定する.

4.2 節 CVD の症状の違いによる色再現

提案手法の色再現ネットワークの入力画像には, CAVE dataset [15] のスペクトル画像を利用した. 3 色覚 1 型と 2 型の色再現の結果をそれぞれ 図 4.2 と 図 4.3 に示す. 両端の下側の画像は, それぞれ XYZ 等色関数を用いて作成した健常者の色再現画像 (左側) と, F. Vie'not らの従来手法 [5] を用いて作成した 2 色覚性の CVD 色再現画像 (右側) である. 上部の画像例は, 提案した色再現ネットワークを用いて出力した色再現画像である. 左から $k = 1$ (健常者), $k = 0.75$, $k = 0.5$, $k = 0.25$, $k = 0$ (2 色覚性の CVD) の時の結果である.

まず, 提案手法 $k = 1$ と $k = 0$ の画像と従来法による画像を比較するとほぼ同等の結果が得られていることがわかる. 健常者の画像 ($k = 1$) に関して言えば, 見分けが難しい. 一方で, 2 色覚性の CVD 色再現の結果では, 色の表現の傾向や区別が困難になる色の傾向がほぼ同じである. しかし, カラーパレットやぬいぐるみの青色の領域で違いが生じている. 違いが生じている原因に関しては, スペクトルを入力としていることや色再現ネットワークによるものが考えられる. この原因を突き詰めるためには, 実際に CVD の見え方と比較検討をする必要があると考えている.



図 4.2 3色覚性 1 型の色再現の結果

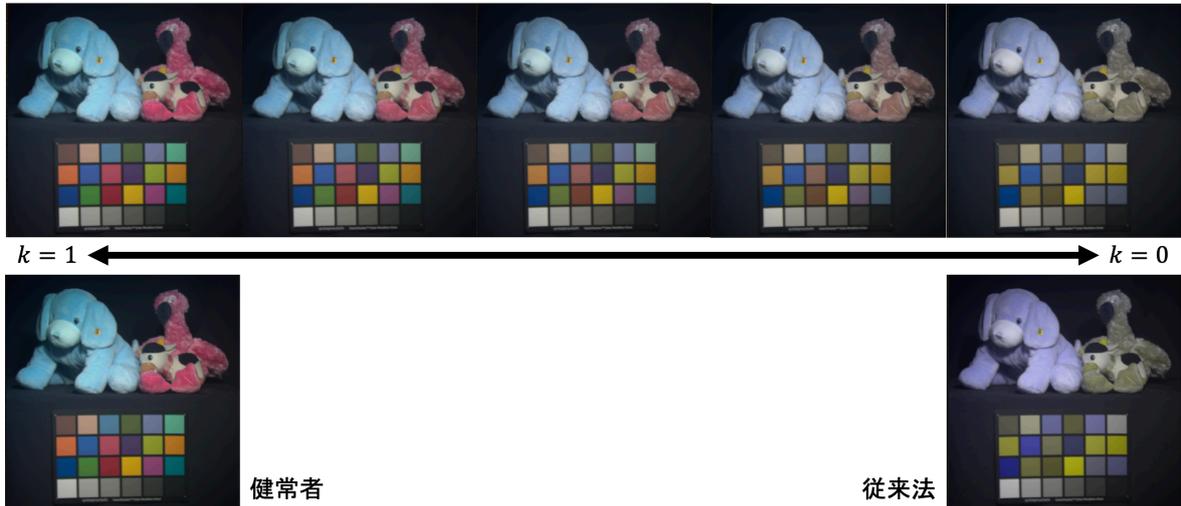


図 4.3 3色覚性 2 型の色再現の結果

次に、3色覚性の CVD の場合は、健常者の色再現画像 ($k = 1$) と 2色覚性の CVD 色再現画像 ($k = 0$) の間で連続的に見え方が変化していることがわかる。さらに、2色覚性の CVD に近づくにつれて、赤と緑の認識が難しくなるという事実と合致した結果になっている。しかし、2色覚性の CVD に近づくにつれて徐々に色が褪せると言われているが、実際にどの程度色が褪せるのかは解明されていない。そのため本研究では、線形的に変化すると仮定し重みを調整している。色の褪せる度合いや実際にどう見えているのか確認することは今後の大きな課題になると考えている。

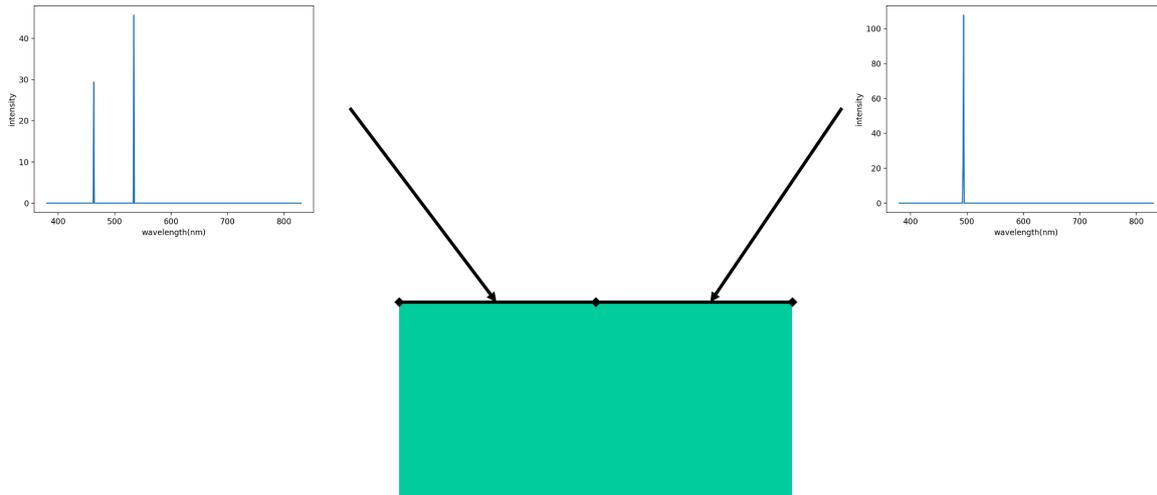


図 4.4 メタメリズムを満たす例

4.3 節 メタメリズムを満たす異なるスペクトルの色再現

メタメリズムは等色条件と呼ばれており、分光分布は違うが同じ色に見える現象を指す。図 4.4 がメタメリズムの例である。図中の下の色再現画像は 2 つのスペクトルに対して同じ色になっているが、左側と右側では異なるスペクトルから色再現を行なっている。この節では、健常者にとってメタメリズムを満たすスペクトル光が CVD の場合はどう見えるかをシミュレーションした。

色再現結果を図 4.5 と図 4.6 に示す。それぞれ、2 色覚 1 型と 2 色覚 2 型の結果である。図 (a) は提案した色再現ネットワークを、図 (b) は F. Vie'not らの従来手法 [5] を用いて色再現を行なった結果である。また、図 (a)(b) の各画像の左側半分はその上部 (左側) のスペクトル、右側半分はその上部 (右側) のスペクトルを入力として色再現を行った。

RGB 三刺激値を入力とする従来法では、健常者に対してメタメリズムを満たすスペクトル光なので入力画像が左側と右側のスペクトルで同一となり、その結果、CVD の場合でも同一の色再現となる (図 4.5(b), 図 4.6(b) 参照)。一方、提案手法では、図 4.5(a) と図 4.6(a) に示すように、CVD の場合でも色再現に違いが生じている。これらの結果は、スペクトルを考慮していない従来の方法では正確に色再現できない可能性を示唆している。このことを検討するためには、健常者にとってメタメリズムを満たすようなスペクトルが、CVD の場合はどのように見えているのかを調査する必要がある、これは今後の課題である。

4.4 節 他のスペクトル画像の適用例

この節では、屋外景観などのスペクトル画像を提案した色再現ネットワークに適用した例を示す。出力画像は図 4.7 から図 4.9 に示す。各図の上段は 3 色覚 1 型の CVD 色再現を、下段は 3 色覚 2 型の CVD 色再現をした結果である。また、右端の画像は F. Vie'not らの従来手法 [5] を適用した 2 色覚性の CVD 色再現を示す。提案した色再現ネットワークを用いて CVD の症状ごとの色再現

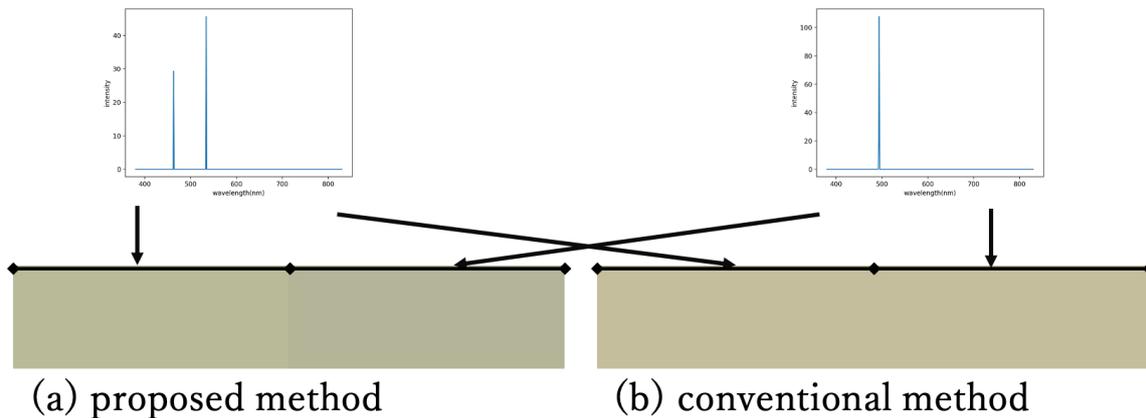


図 4.5 2色覚1型の色再現の結果

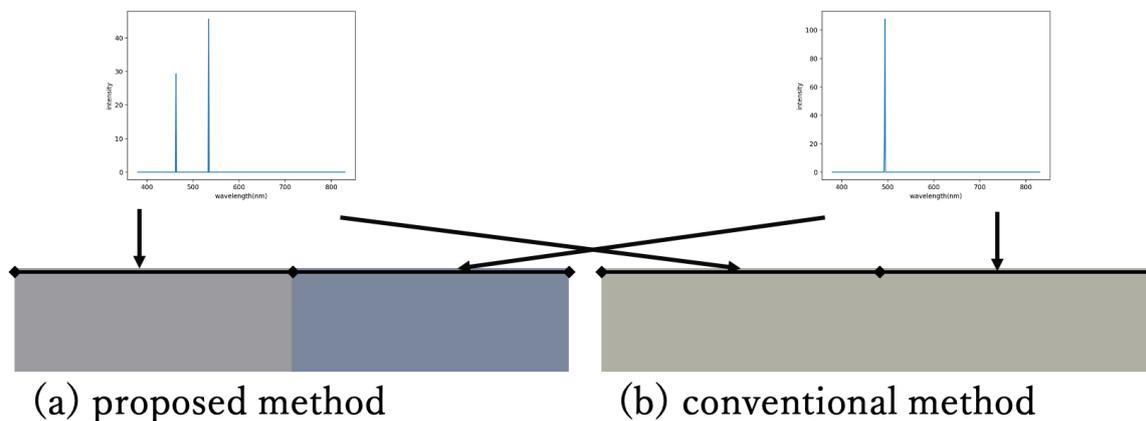


図 4.6 2色覚2型の色再現の結果

画像では、左から $k = 1$ (健常者), $k = 0.75$, $k = 0.5$, $k = 0.25$, $k = 0$ (2色覚性の CVD) の結果である。

図 4.7 から図 4.9 により、赤色の部分が CVD の症状が 2 色覚性の CVD に近づくにつれて色合いが褪せていることがわかる。図 4.7 と図 4.8 は、鳥居やりんごの色により顕著にその傾向が現れており、背景との区別や他の果物との区別が難しくなっている。図 4.9 は、波長依存性の高い金属反射素材を被写体にしたスペクトル画像を用いた結果である。チタンプレートの表面の色、特に赤や緑のプレートの区別が難しくなっている。最後に、 $k = 0$ の画像は、F. Vie'not らの従来手法 [5] の色再現画像と比べほぼ同等の見え方となっている。

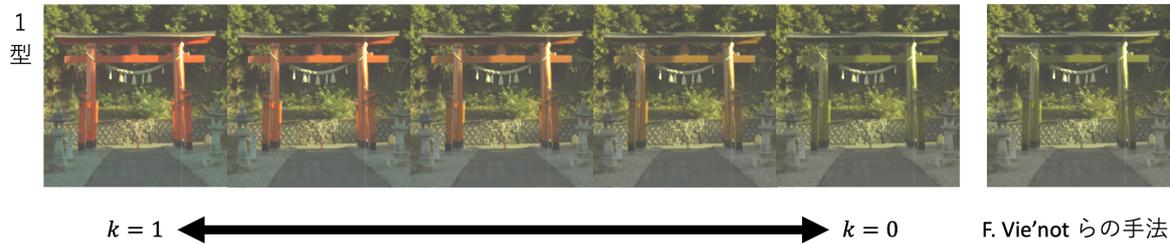


図 4.7 屋外景観 (鳥居)



図 4.8 果物

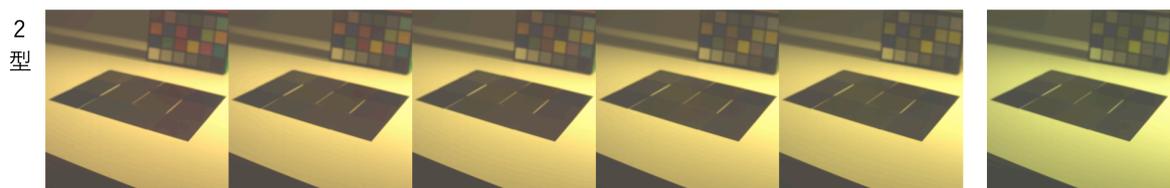
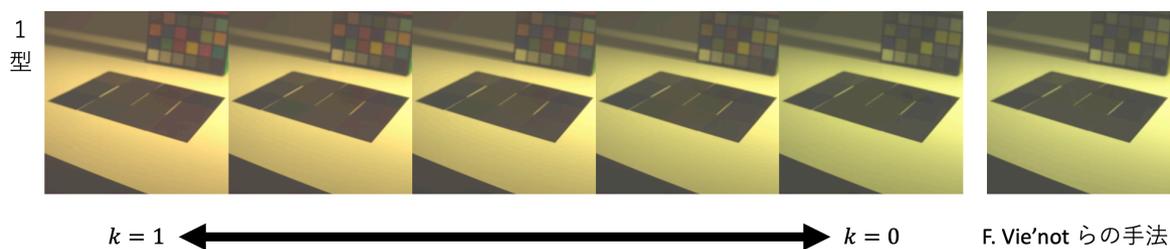


図 4.9 金属反射物

第5章 結論

Conclusion

第 5 章 結論

本論文では有力な視覚モデルである段階説に基づいて色再現ネットワークを構築し、スペクトルから CVD の色覚を再現する手法を提案した. 2 色覚性 CVD に対しては, 色再現ネットワークの重みを黒, 白, 青を健常者と同じ色で再現するように最適化手法 CMA-ES を用いて設定した. 3 色覚性 CVD の重みに対しては, 3 色覚性の CVD 色覚が健常者色覚から 2 色覚性の CVD 色覚へ連続的に変化するという知見に基づき症状の度合いに応じて線形変換により決定した. これにより, さまざまな色覚特性に対する色再現が行えるようになった. さらに, RGB 画像を入力とする従来法では同値と知覚されるようなメタメリズムを満たす色がスペクトルを考慮した提案手法での CVD 色再現では違いが生じることを示した. この結果はさらに検証する必要があるが, CVD 色覚の新たな知見の可能性を示唆している.

色の見え方は主観的なものなので評価が難しい, そのため実際に CVD との実験を行い実際の見え方と本手法での色再現の結果の比較, 検討することが今後の課題となる.

付録 A XYZ 三刺激値と LMS 値の関係

式 (1.4), 式 (1.5), 式 (1.6) で表される XYZ 三刺激値と式 (1.1), 式 (1.2), 式 (1.3) で表される LMS 値との関係を導出する. 式 (1.9) より,

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= \frac{1}{k} A_{\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}} I \\
 &= \frac{1}{k} M_{LMS \text{ to } XYZ} A_{\bar{l}\bar{m}\bar{s}} I \\
 &= \frac{1}{k} M_{LMS \text{ to } XYZ} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

ここで, $A_{\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}}$, $A_{\bar{l}\bar{m}\bar{s}}$ はそれぞれ, XYZ 等色関数と LMS 応答関数を行列として表記したものであり, 次式で表される.

$$A_{\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}} = \begin{bmatrix} \bar{X}(\lambda_1) & \bar{X}(\lambda_2) & \cdots & \bar{X}(\lambda_N) \\ \bar{Y}(\lambda_1) & \bar{Y}(\lambda_2) & \cdots & \bar{Y}(\lambda_N) \\ \bar{Z}(\lambda_1) & \bar{Z}(\lambda_2) & \cdots & \bar{Z}(\lambda_N) \end{bmatrix} \tag{A.2}$$

$$A_{\bar{l}\bar{m}\bar{s}} = \begin{bmatrix} \bar{l}(\lambda_1) & \bar{l}(\lambda_2) & \cdots & \bar{l}(\lambda_N) \\ \bar{m}(\lambda_1) & \bar{m}(\lambda_2) & \cdots & \bar{m}(\lambda_N) \\ \bar{s}(\lambda_1) & \bar{s}(\lambda_2) & \cdots & \bar{s}(\lambda_N) \end{bmatrix} \tag{A.3}$$

また I は, N 個にサンプルされた分光分布である.

$$I = [I(\lambda_1)I(\lambda_2)\cdots I(\lambda_N)]^T \tag{A.4}$$

XYZ 三刺激値から LMS 値への変換は, 式 (A.1) の逆変換となり, 次式で表される.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = k M_{LMS \text{ to } XYZ}^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{A.5}$$

すなわち, XYZ 三刺激値を k 倍することにより LMS 値に変換することができる.

謝辞

本論文の執筆にあたり、日頃から丁寧に相談に応じ、暖かなご指導・ご助言を頂きました金田和文教授に深く感謝いたします。ゼミや研究で多くのご指摘・ご意見を頂いた檜垣徹准教授、Bisser Raythev 准教授に深く感謝いたします。研究生活全般を通して多方面での御支援をして頂いた開内幸治技術員に深く感謝いたします。

また、大学生活全般を通して共に有意義な時間を過ごした研究室の同期、先輩、後輩一同に感謝いたします。

最後に、大学生活を物心両面において支援してくれた両親及び家族、友人に深く感謝いたします。これらの支援がなければ本研究を遂行することはできませんでした。心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 松阪 喜幸, デジタル画像処理 改訂新版, 画像情報教育振興協会, 2018.
- [2] 溝上陽子, “色覚の感度特性に基づく色表現と色覚メカニズムの環境適応性”, 日本色彩学会, vol. 88(10), pp. 361–366, 2015.
- [3] Institute of Ophthalmology, “Cie (2012) 10-deg xyz “physiologically-relevant” colour matching functions”, 2012, <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/database/text/cienewxyz/cie2012xyz10.htm>.
- [4] H. Brettel, F. Vie’not, and J. D. Mollon, “Computerized simulation of color appearance for dichromats”, *JOS A*, vol. 14(10), pp. 2647–2655, 2009.
- [5] F. Vie’not, H. Brettel, and J. D. Mollon, “Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats”, *CCC*, vol. 24(4), pp. 243–252, 1999.
- [6] G. M. Machado, M. M. Oliveria, and L. A. Dernandes, “A physiologically-based model for simulation of color vision deficiency”, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 15(6), pp. 1291–1298, 2009.
- [7] L. T. Shape, A. Stockman, H. jügle, and J. Nathans, “Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness”, *CV*, pp. 3–51, 1999.
- [8] Z. Zhu, M. Toyoura, K. Go, K. Kashiwagi, O Fujishiro, T.-T. Wong, and X. Mao, “Personalized image recoloring for color vision deficiency compensation”, *IEEE*, vol. 24, pp. 1721 – 1734, 2021.
- [9] C. R. Ingling Jr and B. H.-P. Tsou, “Orthogonal combination of the three visual channels”, *Vision Research*, vol. 17(9), pp. 1075–1082, 1977.
- [10] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyüz, and G. M. Johnson, *Color Imaging: Fundamentals and Applications*, A K Peters/CRC Press, 2008.
- [11] E. Hering, *On the Theory of Sensibility to Light*, Harvard University Press, 1878.
- [12] L. M. Hurvich and D. Jameson, “Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. ii. brightness saturation and hue in normal and dichromatic vision”, *Journal of the Optimal society of America*, vol. 45, pp. 602–616, 1955.
- [13] 子安 増生, 丹野 義彦, and 箱田 裕司, *心理学辞典*, 有斐閣, 2021.
- [14] N. Hansen and A. Ostermeier, “Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies”, *Evol. Comput.*, vol. 9(2), pp. 159–195, 2001.
- [15] F. Yasuma, T. Mistunaga, D. Iso, and S. K. Nayar, “Generalized assorted pixel camera: Post-capture control of resolution, dynamic range and spectrum”, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 19(9), pp. 2241–2253, 2010.

研究業績

国際会議

HARUYA TAKAHASHI, TORU HIGAKI, BISSER RAYTCHEV, KAZUFUMI KANEDA, 2023.Reproduction of Color Vision Deficiency Considering Spectrum, *IWAIT 2023*.