

SVM と CIELUV 色空間を用いた 1 型 2 色覚, 2 型 2 色覚の色の 見え方の分類

坂井 法仁

令和 2 年 2 月

九州大学理学部物理学科
情報理学コース

目次

第1章	序論	1
1.1	ヒトの眼球の構造	1
1.2	色覚異常について	2
1.3	色覚シミュレーションについて	3
1.4	カラーユニバーサルデザインについて	4
1.5	本稿の目的	4
第2章	関連研究	6
第3章	実験と結果	8
3.1	データセットの説明	8
3.2	実験1	8
3.2.1	手続き	8
3.2.2	結果	11
3.3	実験2	13
3.3.1	手続き	13
3.3.2	結果	14
第4章	結論	16
参考文献		17

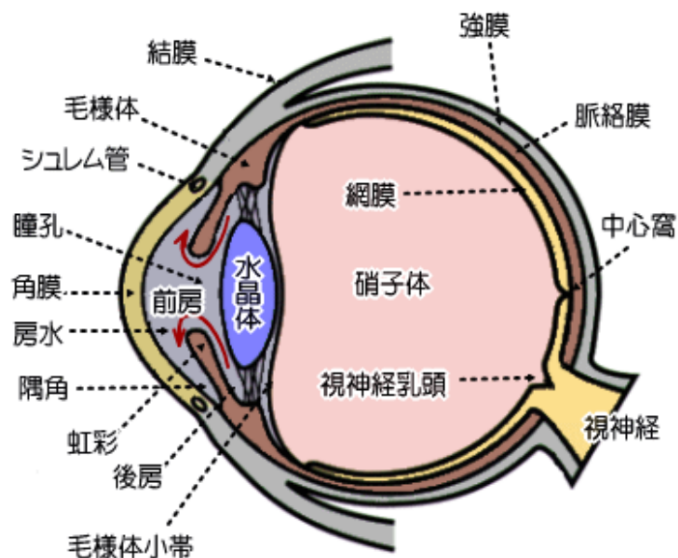


図 1.1.1 眼球の構造（あだち眼科 [1] より引用）.

第 1 章 序論

1.1 ヒトの眼球の構造

ヒトは眼球を使って物を見る．

眼球の構造を図 1.1.1 に示す．外界から入射する光は角膜（cornea）と前房（前眼房とも；anterior chamber）を通過して水晶体（crystalline lens）に入り，そこで屈折する．更に硝子体（vitreous body）を通過して網膜（retina）で結像する¹．網膜には L 錐体（L cone），M 錐体（M cone），S 錐体（S cone），杆体（桿体とも；rod）の 4 種類の視細胞（photoreceptor）が分布している．3 種類の錐体は中心窩（fovea）付近に局在していて，十分明るい環境で機能し，波長に対する各々の応答の程度の差異によって色を知覚できる．この応答を波長ごとにプロットした物が図 1.1.2 であり，これは国際照明委員会（Commission Internationale de l'Éclairage；CIE）が 2015 年に制定した 2° 視野の CIE2015XYZ 表色系（CIE2015XYZ color system）から導出される正規化錐体分光感度（normalized cone fundamental）である．杆体

1 水晶体のピント調整機能の低下で結像位置が網膜の前後に移動する現象が近視，遠視，老眼である．

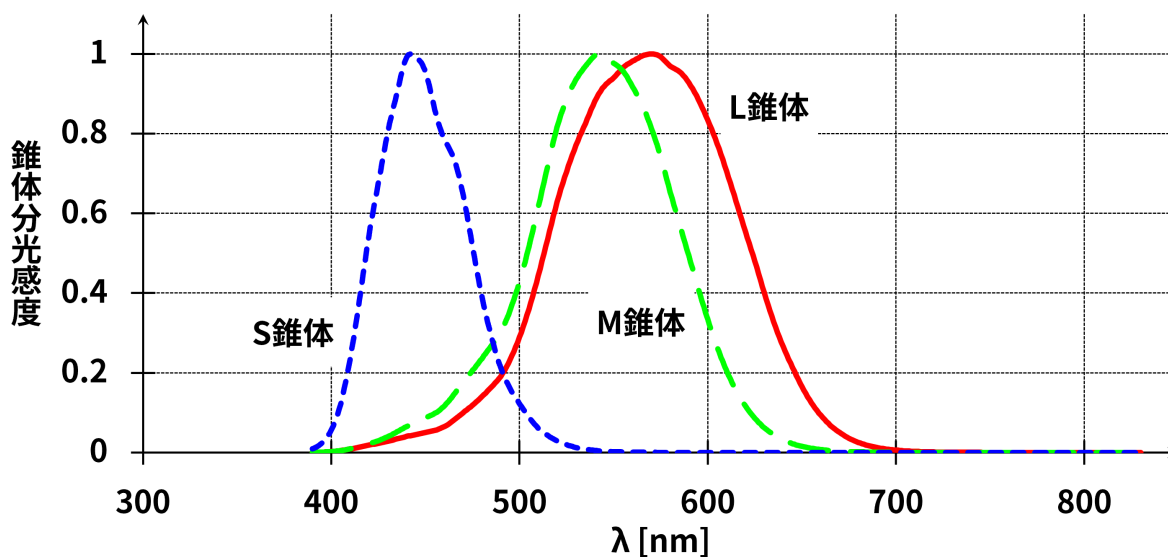


図 1.1.2 CIE2015XYZ 表色系 (2° 視野) から導出される正規化錐体分光感度.

は錐体と比べて光への感度が良く、暗所で機能する [2]. 杆体は 1 種類のみである為に色の知覚には無関係であると言われるが、錐体が十分に機能できない暗さで色覚に影響を及ぼしているとする研究もある [3].

1.2 色覚異常について

世の中には、先天的な X 染色体異常がトリガーとなる色盲者 [4], 色弱者 [5] や、加齢によって後天的に色の見え方が変化する人 [6] がいる.

色盲者は 1 種類以上の錐体が先天的に欠損していて², 色弱者は欠損は無いものの刺激の光の波長に対する錐体の感度分布が異なっている. これらを合わせると、国内では男性の約 5%, 女性の約 0.2% が色盲者, 色弱者である [7, p. 4]. L 錐体が欠損している色盲を 1 型 2 色覚 (protanopia), M 錐体が欠損している色盲を 2 型 2 色覚 (deutanopia), S 錐体が欠損している色盲を 3 型 2 色覚 (tritanopia) という³. 先天色覚異常の大多数は 1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚である [8, p. 9].

加齢による色の見え方の変化は核白内障 (nuclear cataract) に伴う水晶体の黄変によって光が錐体に届く前にスペクトルが歪められることによって起こる. 短波長の光が吸収されや

2 或る錐体の個数は少ないが完全に欠損している訳ではないという人もいて、こちらは軽度であれば色弱に含めることがある.

3 色盲者を表す時は接尾辞が -ia から -e に変化する. *E.g.* protanope.

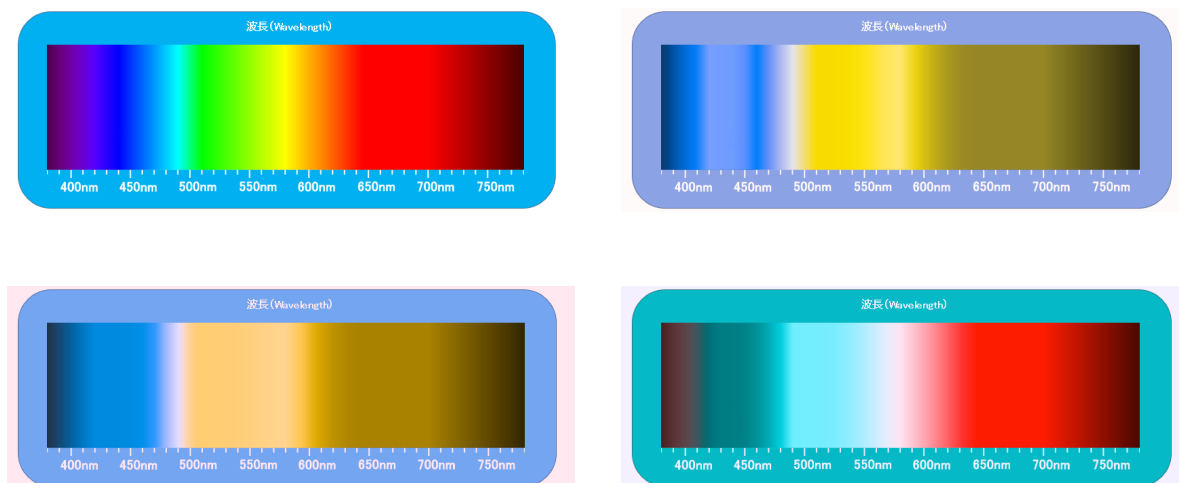


図 1.3.1 左上：可視光のスペクトル画像（波長域：380 nm–780 nm），右上：元画像の 1 型 2 色覚の見え方のシミュレーション，左下：元画像の 2 型 2 色覚の見え方のシミュレーション，右下：元画像の 3 型 2 色覚の見え方のシミュレーション．

すい為，青紫や青緑等の青系統の色の識別が難しくなる他，液体，炎や電光掲示板が見え辛くなる [9]．

1.3 色覚シミュレーションについて

色盲のシミュレータは多数あるが，その多くは Brattel らが開発したアルゴリズム [10] をベースにしている．Brattel らのアルゴリズムは，画像の RGB 値を LMS 色空間 (LMS color space)⁴に座標変換してから，各色覚特性に合わせた適切な処理を行い， RGB 色空間に逆変換する．シミュレータを用いることで，ディスプレイに映し出された画像をリアルタイムに色変換させることが可能になり，マジョリティである 3 色覚者でも 2 色覚の見え方を擬似体験できるようになった．図 1.3.1 は可視光のスペクトル画像⁵とそれに 1 型 2 色覚，2 型 2 色覚，3 型 2 色覚のシミュレーションを実行した結果である．シミュレータは Colorblind Pro を使用した．1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚の色の見え方は似ている．この原因として，図 1.1.2 から分かるように， L 錐体と M 錐体の錐体分光感度の分布は近くにあり， LMS 色空間は L 軸の基底ベクトルと M 軸の基底ベクトルが近い向きを向いている斜交座標系になっている（図 1.3.2 参照）．1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚の色の見え方の類似性はここからきていると考えられる．

4 3 種類の錐体の応答値を 3 次元空間にプロットすることで構成される．

5 分析・計測・測位用 アート開発 Labs[11] より引用．

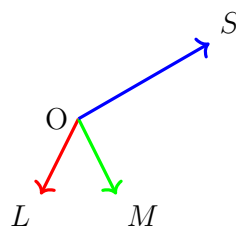


図 1.3.2 LMS 色空間の座標軸のイメージ（実際の座標軸同士の為す角はこの通りでない）。

1.4 カラーユニバーサルデザインについて

Brattel らのアルゴリズムの恩恵は他にもある。それは、色盲者や色弱者でも識別しやすい色の組み合わせを用いて情報伝達を行うカラーユニバーサルデザインを考慮しやすくなったということである。近年、多くの色覚異常当事者の協力の下でカラーユニバーサルデザイン配色が考案される ([12, pp. 1091–1099], [13] 等), どんな人でも適切に識別できる組み合わせのチョークが開発される [14], JIS Z 9013 (図記号—安全色及び安全標識—安全色の色度座標の範囲及び測定方法) が改正される [15] 等の活動が行われてきた。今後もこれらの活動が広がっていく中で、色覚シミュレータを上手く活用すれば当事者と意見を摺り合わせる回数を減らせる可能性が高くなり、デザイナー、当事者双方の負担を軽減でき得るからである。

1.5 本稿の目的

しかし、Brattel らのアルゴリズムを零から実装すると、前処理として可視光波長域上での数値積分を 3 回、3 次正方行列の逆行列の計算を 1 回、3 次元ベクトルの外積を 2 回実行し、更に各色毎に 3 次正方行列と 3 次元ベクトルの乗算を 3 回ずつ行わなければならない、24 bit の RGB 色空間で 2^{24} 色⁶ 全てに亘って変換を掛けながら当事者と見え方を摺り合わせていくのは大変な時間を要する。その上、実装や改良に際して色彩学や生理学に関する必要な知識が多く、専門外の人が取り組みにくくなっていると言わざるを得ない。

そこで本稿では、人口が比較的多く、色の見え方が類似している 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚に着目する。この 2 種類の色覚で識別しやすい配色を予め求めていれば実際のデザイン時に繰り返し活用できるので、機械学習を用いて効率的に配色セット設計を行う。本学芸術

6 $2^{24} = 16,777,216$.

工学研究院デザイン人間科学部門の須長正治准教授が研究されている natural color system (NCS) に関する色のデータセット⁷を用いて, NCS の AdobeRGB⁸座標, サポートベクトルマシン (support vector machine ; SVM), Gauß 過程 (Gaussian process ; GP) による Bayes 最適化 (Bayesian optimization) で NCS の色を 1 型 2 色覚, 2 型 2 色覚それぞれの色の見え方に分類できることを示す. 更に, それで得たパラメータと 1948 色の NCS 全体を用いて, AdobeRGB 色空間上の非負格子点 (2^{24} 色) 全てにおける各 2 色覚での色の見え方を予測する. 各非負格子点の正解ラベルが未知であることを踏まえ, 色差 (color difference)⁹が定義されている均等色空間 (uniform color space) の一つ, CIE1976 $L^*u^*v^*$ 色空間 (CIELUV 色空間) [16, p. 64] に座標変換して予測ラベルの代表色との色差による精度評価も行う.

7 本来は 1950 色であるが, 手元に届いた時点で S2075-Y60R と S3050-R20B が同梱されていなかったという. 従って, 以下で「NCS」と言う時はこれらを除いた 1948 色を指す.

8 1998 年考案.

9 2 つの色の区別しやすさに関する定量的指標.

第 2 章 関連研究

Huang らは Brattel らのアルゴリズムを基に、画像から 1 型 2 色覚者、2 型 2 色覚者でも識別しやすい色の組み合わせを導出して色変換する計算手法を提案している [17]. 大まかな考え方は「変換の自然さ」を維持しながら色差を保つ色変換を最適化で見つけることである. 「変換の自然さ」を維持する為に、(1) 変換前後で輝度 (luminance) を変えない、(2) 変換前で同じ色相 (hue) を持つ 2 色は変換後も同じ色相を持つ、(3) 変換前で同じ彩度 (saturation) を持つ 2 色は変換後も同じ彩度を持つように、CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間 (CIELAB 色空間) 上の a^*b^* 平面を回転する. その回転角は、変換前の色差と合成変換 (Brattel o Huang) 後の色差の差の平方和と変換前後での色差の平方和の非負定数倍を足し、これを誤差関数として最小化することで導出する. 赤色の花や草木が写った写真に対して手法を適用した結果、変換前を 2 色覚者が見たら全体的にくすんだ黄色に見えていたが、変換後は花がマゼンタ色に変化し、2 色覚者には青紫色に見えるようになり、花と草木を識別できるようになった. 当研究は写真や既成のポスター等の掲示物について元々の印象をあまり損なわずに 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚への対応が為されるようにリデザインする際には有効であると考えられ、カラーユニバーサルデザインを推進する上で役立つと言える. しかし、実際には多少色が変わる為、現実を色で描写する際に 3 色覚者に誤解を招く可能性がある. また、誤差関数の第 2 項の定数係数はハイパーパラメータであり、この設定によって特に 3 色覚での色の見え方が大きく変化し得ることから、実用時は 3 色覚者、2 色覚者（もしくは色覚シミュレータ）が共同で出力を見ながらパラメータを微調整する必要性が生じてしまう. 本稿では、光源の設定という最小限の仮定から SVM + Bayes 最適化と CIELUV 色空間上の色差の代数計算、解析計算のみで色を分類する為、一度分類作業が完了すれば使い回しが可能で、零から掲示物をデザインする時にも使える.

Funt と Zhu は 2 型 2 色覚の色の見え方を Brattel らのアルゴリズムに依存しない形で計算する手法を検討している [18]. 24 bit sRGB の画像を CIE1931XYZ 表色系に座標変換し、Hunt-Pointer-Estévez (HPE) 変換行列で LMS 色空間に変換する. 更に $M = 0$ で M 錐体の応答を無くして逆変換で sRGB 画像に戻す. 以上の変換前後の対を畳み込みニューラルネッ

トワーク (convolutional neural network) の教師データにする．複数の写真に適用した結果，変換前後で大きな変化が無く，赤色や緑色も残ってしまった．2 型 2 色覚が単純な $M = 0$ 平面上での見え方をしていないという結論が得られている．本稿の 2 色覚変換には Brattel らのアルゴリズムを採用していて，CIELUV 色空間上の色差で分類精度の評価を行っている為，本来見えない筈の色が見える現象に翻弄されにくくなっている．

第3章 実験と結果

3.1 データセットの説明

本稿で使用するデータセットは NCS 1948 色の AdobeRGB 座標（整数値への四捨五入前，但し，計算値が負になった物は 0 にしてある），及び，1 型 2 色覚，2 型 2 色覚それぞれについて各色を 43 クラスでラベリングした結果である．データセットの概要を表 3.1.1，表 3.1.2 に示す．以降，列名に表れる「P」は 1 型 2 色覚，「D」は 2 型 2 色覚のことを意味するものとする．NCS はいずれも物体色である為，光源色である AdobeRGB 色空間への座標変換の前提として光源と XYZ 表色系の仮定が要求される．本データセットでは，光源に CIE 標準光源 D65（CIE standard illuminant D65）を，XYZ 表色系に CIE1931XYZ 表色系（2° 視野）[19, pp. 28–30] を採用している．城戸らの研究（[20, 図 1]，[21, 図 1]）に倣って各代表色を黄青—明度平面に置くと図 3.1.1 のようになる¹⁰．周囲の数字は Munsell 表色系上の 5Y-5PB 平面における彩度（Munsell 表色系では chroma という），明度（lightness, Munsell 表色系では value という）に対応する．

3.2 実験 1

3.2.1 手続き

実験 1 では，本データセットを 1 型 2 色覚，2 型 2 色覚の色の見え方クラスにそれぞれ分類する分類器を作成する．乱数シードを基にデータセットを 80/20 に分割する．その上で，訓練データに対して SVM の分類器を導入する．カーネルは radial basis function kernel で固定

¹⁰ 本来のクラス数は 44 であるが，y-Bk に属する色が NCS に無かったので，表 3.1.1，表 3.1.2 ではそれを無視し，図 3.1.1 ではそれを #000000 で塗っている．

表 3.1.1 データセットの概要.

	NCS 代表色	Adobe <i>R</i>	Adobe <i>G</i>	Adobe <i>B</i>	#P	#D	# ($P \cap D$)
Wt	S0500-N	235.6629	234.7774	231.2127	23	20	12
plGy	S2000-N	195.6736	194.7891	191.3287	40	36	20
ltGy	S3500-N	163.9940	162.9809	160.8466	65	58	31
mdGy	S5000-N	134.1809	134.1703	134.2813	70	61	32
dkGy	S7500-N	86.9541	86.8106	86.6477	70	65	28
Bk	S9000-N	47.2956	47.8310	49.5712	13	11	9
y-Wt	S0507-Y	239.5724	235.2736	209.1030	74	70	63
y-plGy	S2005-Y	197.0129	194.0007	177.4013	94	102	75
y-ltGy	S2502-Y	184.4848	183.2185	174.1260	77	73	44
y-mdGy	S5010-G90Y	133.8320	129.6478	109.4358	91	74	41
y-dkGy	S8010-G90Y	72.0204	68.0469	54.3256	75	58	31
vp-Y	S1020-Y	225.2654	214.4556	163.4146	64	62	53
lg-Y	S2020-Y	196.4906	186.1061	141.9709	76	85	54
mg-Y	S4020-Y	150.4791	138.6121	101.8951	103	104	55
dg-Y	S6020-Y	111.1297	99.3336	69.0294	80	82	39
vd-Y	S7020-G90Y	82.5625	75.5720	51.5917	17	13	5
pl-Y	S0540-Y	243.6672	225.0307	135.9848	31	29	23
sf-Y	S2040-Y	198.0241	178.9121	103.2851	73	78	46
dl-Y	S3560-Y	150.4791	138.6121	101.8951	126	143	83
dk-Y	S5040-Y	122.8045	104.0727	52.9174	52	51	25
lt-Y	S0560-Y	238.1361	209.5451	87.7278	26	23	20
st-Y	S1080-Y	214.4635	182.5300	0.0000	47	53	32
dp-Y	S2070-Y	185.2438	157.4583	42.1169	30	39	15
vv-Y	S0580-Y	238.6570	204.8486	0.0000	1	3	1
b-Wt	S0505-R90B	224.6986	229.3882	233.0692	24	21	16
b-plGy	S0907-R90B	211.9650	218.4358	224.1348	45	46	23
b-ltGy	S3005-R80B	164.4555	168.6782	174.3469	34	35	12
b-mdGy	S6005-R80B	103.6745	107.1785	114.0519	44	52	15

表 3.1.2 データセットの概要 続き.

	NCS 代表色	Adobe <i>R</i>	Adobe <i>G</i>	Adobe <i>B</i>	#P	#D	# ($P \cap D$)
b-dkGy	S7010-R90B	73.8830	81.1664	91.7979	31	35	9
b-Bk	S8010-R50B	57.8759	50.8047	62.8086	3	1	1
vp-pB	S0515-R90B	204.6848	217.5930	230.3978	25	29	18
lg-pB	S1515-R90B	179.8229	192.8497	206.1419	38	36	16
mg-pB	S4010-R90B	132.2837	140.6962	150.5120	35	37	12
dg-pB	S5020-B	93.2631	110.9807	127.1168	29	34	10
vd-pB	S8010-R90B	47.3202	54.5546	66.1253	12	9	5
pl-pB	S0530-R90B	174.2376	200.7052	226.8996	21	24	17
sf-pB	S2030-R90B	140.7151	164.1106	190.6701	36	40	18
dl-pB	S4030-R90B	100.1698	120.9944	149.8754	60	67	40
dk-pB	S6030-R90B	50.6591	70.7194	97.8596	17	16	8
lt-pB	S1050-R90B	122.1359	165.7693	217.2947	20	19	15
st-pB	S4040-R90B	78.4195	105.1236	145.6135	16	15	6
dp-pB	S4550-R90B	25.5495	68.4164	115.8239	28	24	21
vv-pB	S3060-R90B	48.3133	96.8561	157.3008	12	15	8
合計					1948	1948	1107

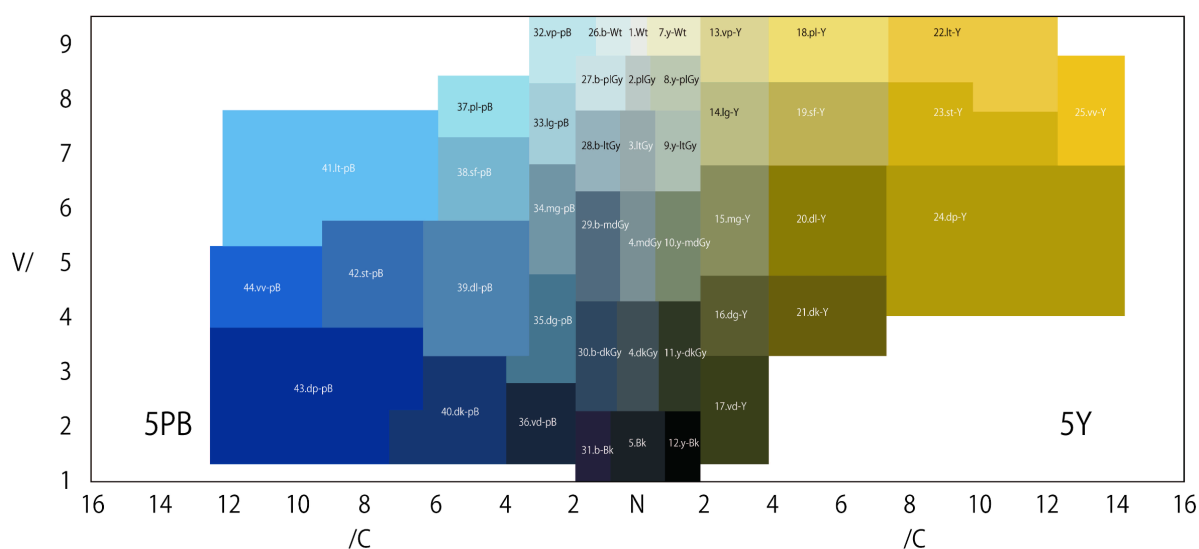


図 3.1.1 黄青一明度平面.

表 3.2.1 実験 1 の結果の数値表.

	P	D
γ	1.0830×10^{-6}	2.7812×10^{-6}
C	1.0486×10^6	1.0412×10^6
<i>class_weight</i>	<i>None</i>	“balanced”
正解率（訓練データ）	0.9936	0.9929
正解率（テストデータ）	0.9077	0.9154

し, `sklearn.svm.SVC` のハイパーパラメータ γ , C , *class_weight* を学習する¹¹. ハイパーパラメータの推定に GP による Bayes 最適化を用いる. 同じ乱数シードで訓練データを更に 5 分割し,

$$\gamma \in [2^{-20}, 2^{20}] \quad (\text{但し, 対数一様分布 (log-uniform distribution)}), \quad (3.2.1)$$

$$C \in [2^{-20}, 2^{20}] \quad (\text{但し, 対数一様分布}), \quad (3.2.2)$$

$$\textit{class_weight} \in \{\textit{None}, \text{“balanced”}\} \quad (3.2.3)$$

という条件の下, 分割された訓練データそれぞれの正解率 (accuracy) の平均値を最大にするパラメータを推定する. チューニングに用いる `skopt.gp_minimize` のパラメータについては *acq_func* = “EI”, *n_calls* = 200 で設定する¹².

3.2.2 結果

分割の乱数シードは 88058390 である. 実験 1 の結果を表 3.2.1 に纏めた.

2 型 2 色覚は式 (3.2.1)–(3.2.3) 右辺内部で収束している. しかし, 1 型 2 色覚は $C = 1.0486 \times 10^6 \gtrsim 2^{20}$ より式 (3.2.2) 右辺の上限に一致してしまっている. 正解率から推測するに, 1 型 2 色覚の最適な C は 2^{20} よりもやや大きいと考えられる.

テストデータにおける混同行列 (confusion matrix) を図 ?? に示す. 上段は各々の絶対数, 下段は正解クラス別に割合を取った物である. 下段で対角成分から左または右に 4 列離れた成分が灰明るく光っている様子が見られる. これは, 図 3.1.1 で明度が等しく彩度方向で隣接しているクラス同士の関係であり, AdobeRGB 色空間と Munsell 表色系という異なる空間ではあるものの, この関係にあるクラスが近くにあった為, 誤分類が生じたと考えられる.

11 これ以外のパラメータは scikit-learn 0.22.1 の `sklearn.svm.SVC` の初期設定のままである.

12 これ以外のパラメータは scikit-optimize 0.5.2 の `skopt.gp_minimize` の初期設定のままである.

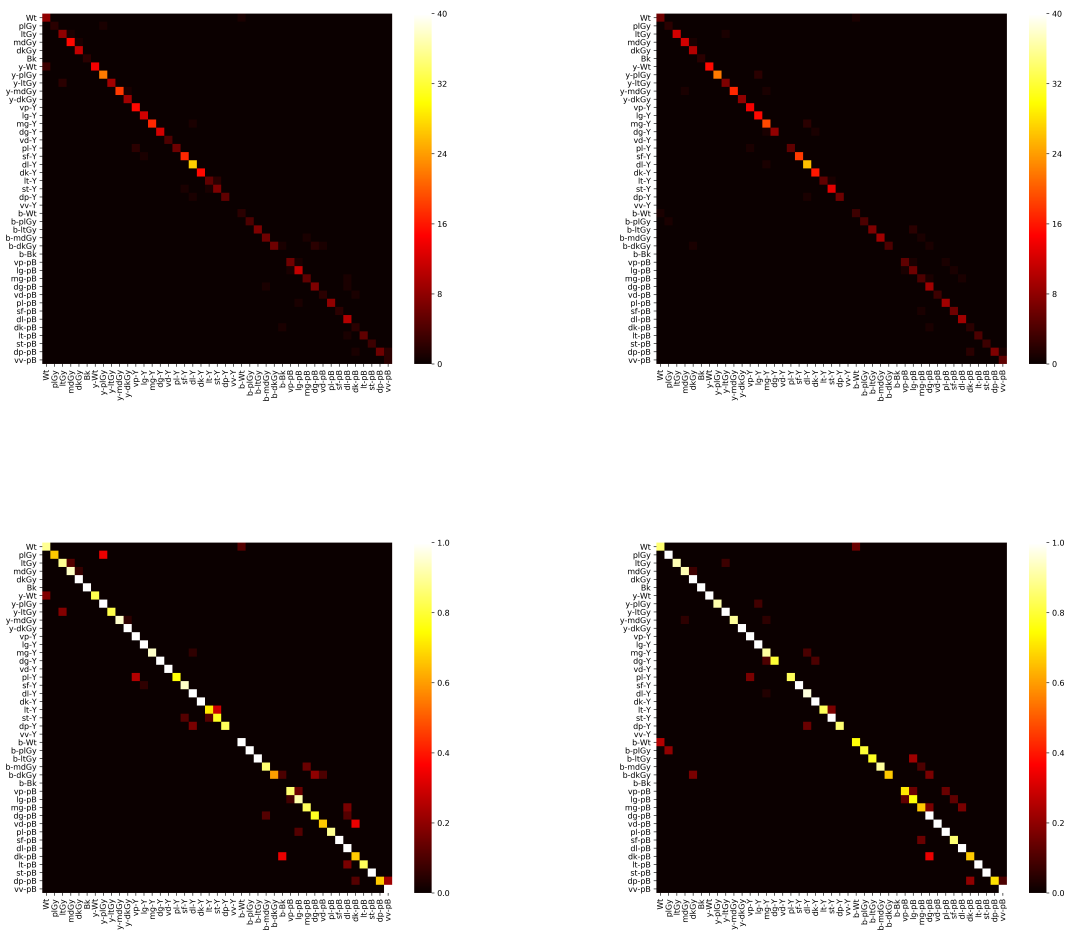


図 3.2.1 左上：1 型 2 色覚の混同行列，右上：2 型 2 色覚の混同行列，左下：1 型 2 色覚の混同行列の正解クラス別割合，右下：2 型 2 色覚の混同行列の正解クラス別割合．

訓練データでの正解率と混同行列を踏まえると、1 型 2 色覚、2 型 2 色覚のいずれも SVM + Bayes 最適化で十分学習できたと言えるであろう。

3.3 実験 2

3.3.1 手続き

実験 2 では、1948 色のデータセット全てと実験 1 で得たパラメータを用いて、24 bit AdobeRGB 色空間上の非負格子点 (2^{24} 色) 全てにおける 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚での色の見え方を予測する。各色は正解ラベルを 2 つずつ持っているはずであるが我々には未知であり、予測の精度を検証できない。しかし、実験 1 の結果から 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚いずれにおいても 1 割程度の誤分類が発生することは予想できる。そこで、均等色空間の一つである CIELUV 色空間に座標変換して議論する。均等色空間は CIELUV や CIELAB の他に CIEDE2000 や CAM02-UCS 等様々ある [16] が、CIELUV は変換が比較的単純である為、計算速度が求められる際には役立つ色空間である。一方で、CIELUV や CIELAB は新しい均等色空間と比べて知覚の均一性が弱いという欠点がある [22, p. 10]。

まず、表 3.1.1、表 3.1.2 の各代表色を、CIE1931XYZ 表色系¹³、 LMS 色空間¹⁴を経由して 1 型 2 色覚、2 型 2 色覚の LMS に写し、再度 CIE1931XYZ を経由して CIELUV に座標変換する。任意の 2 色 c_α, c_β 間の色差 $\Delta E^{L^*u^*v^*}(c_\alpha, c_\beta)$ は CIELUV 上の Euclid 距離で

$$\Delta E^{L^*u^*v^*}(c_\alpha, c_\beta) = \left\| c_\beta^{L^*u^*v^*} - c_\alpha^{L^*u^*v^*} \right\|_2$$

と表現できる。これを用いて、43 色における距離行列を計算すると図 3.3.1 を得る。Munsell 表色系 (図 3.1.1) で近い位置関係にあった対は CIELUV 色空間上でも比較的近くにあることが分かる。

次に、各クラス $(C_i)_{i=1}^{43}$ について代表色を $\hat{c}_i \in C_i$ とし、自分自身を除いて最も近い代表色 $\hat{c}_{\tilde{j}(i)}$ との色差 $\Delta E_i^{L^*u^*v^*}$ を距離行列から

$$\tilde{j}(i) \in \arg \min_{j \neq i} \Delta E^{L^*u^*v^*}(\hat{c}_i, \hat{c}_j),$$

13 変換 24bit AdobeRGB \rightarrow CIE1931XYZ は Adobe® のマニュアル [23] を参考にした。

14 CIE 標準光源 D65 下での HPE 変換行列を使用した。

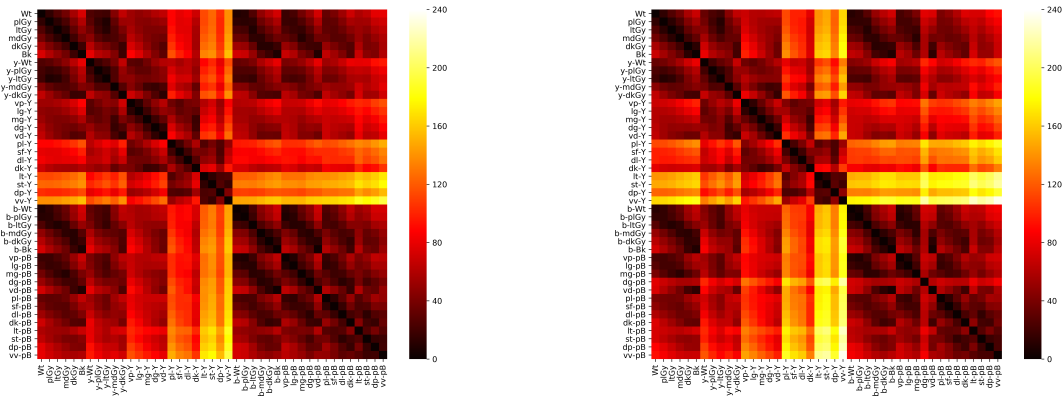


図 3.3.1 左：1 型 2 色覚における代表色の距離行列，右：2 型 2 色覚における代表色の距離行列．

$$\Delta E_i = \Delta E^{L^*u^*v^*}(\hat{c}_i, \hat{c}_{\tilde{j}(i)})$$

で求め，代表色 $\hat{c}_i^{L^*u^*v^*}$ を中心とする半径が ΔE_i である開球 $B(\hat{c}_i^{L^*u^*v^*}, \Delta E_i)$ と，半径がその半分である開球 $B(\hat{c}_i^{L^*u^*v^*}, \Delta E_i/2)$ を考える．以下，便宜的に前者を弱採択域，後者を強採択域と呼ぶ（図 3.3.2，図 3.3.3 参照）．24 bit AdobeRGB 色空間上の各色について実験 1 で得た SVM で 1 型 2 色覚，2 型 2 色覚についてのラベルを予測し，代表色に対して行ったのと同様に各 2 色覚への写像と座標変換で 2 色覚の CIELUV 座標を求め，その予測ラベルの代表色の弱／強採択域に属していれば弱／強採択されるとする（図 3.3.2，図 3.3.3 の色 c の予測ラベルが C_i であるとする， c は弱採択されるが強採択されない）．

3.3.2 結果

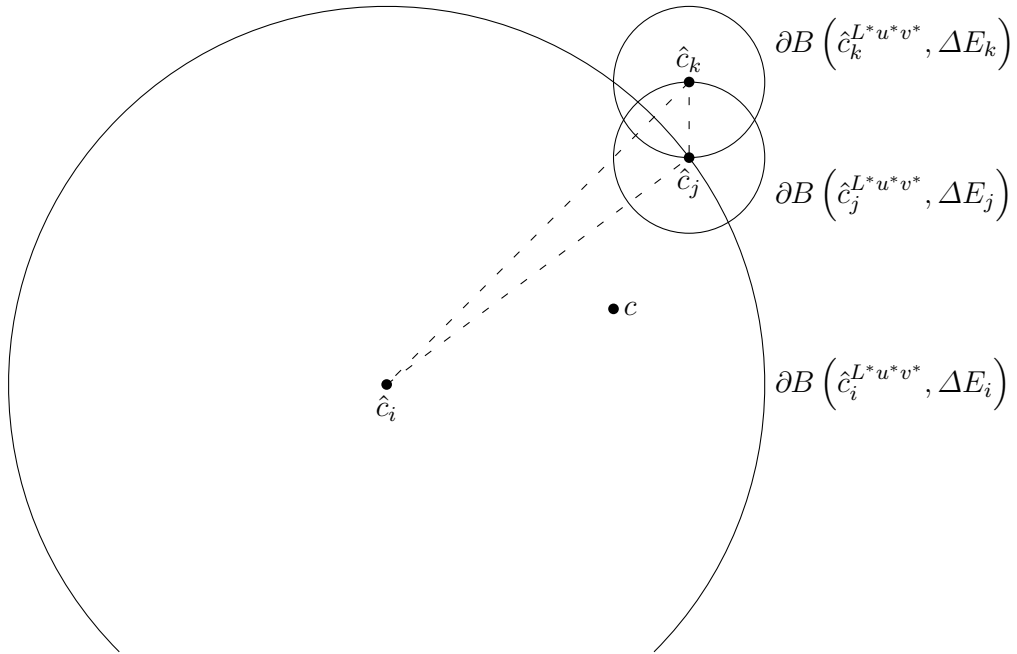


図 3.3.2 弱採択域のイメージ.

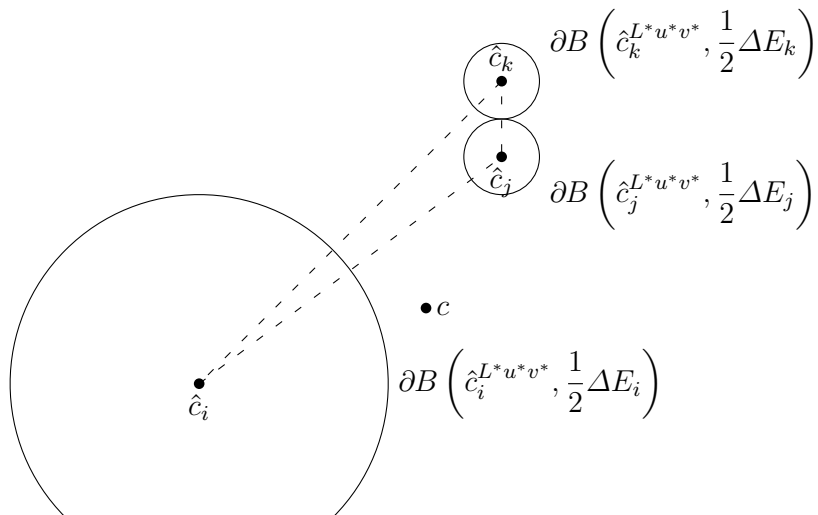


図 3.3.3 強採択域のイメージ.

第 4 章 結論

参考文献

- [1] あだち眼科「眼についての病気・基礎知識」, 2006. アクセス日: 2020 年 1 月 26 日. [オンライン]. 利用可能: <http://adachi-eye-clinic.com/chishiki/kozo.html>.
- [2] 細木ゆかり, 小池千恵子, 竹田有加里, 天野晃「杆体・錐体視細胞光応答機構初期過程モデルによる視物質——トランスデューシン間シグナル増幅現象の再現」, 『生体医工学』, 第 52 巻, 第 3 号, pp. 145–155, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.11239/jsmbe.52.145>.
- [3] 竹下祐, 岡嶋克典, 辻村誠一「杵体細胞の錐体拮抗型色メカニズムに対する影響」, 『映像情報メディア学会技術報告』, 第 38 巻, 第 46 号, pp. 5–7, 2014, doi: http://dx.doi.org/10.11485/itetr.38.46.0_5.
- [4] 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 (全 3 回) 第 1 回色覚の原理と色盲のメカニズム」, 『細胞工学』, 第 21 巻, 第 7 号, pp. 733–745, 2002.
- [5] 須長正治, 桂重仁, 光安祥代「S 錐体刺激値差を手掛かりとした 3 色覚と強度異常 3 色覚の視覚探索能の比較」, 『日本色彩学会誌』, 第 41 巻, 第 4 号, pp. 154–160, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.15048/jcsaj.41.4_154.
- [6] 栗木一郎, 石井渉, 内川恵二「加齢による水晶体黄変が色覚におよぼす効果」, 『照明学会誌』, 第 84 巻, 第 2 号, pp. 107–116, 2000, doi: http://dx.doi.org/jiej1980.84.2_107.
- [7] 神奈川県医師会「色覚異常について」, 2019. アクセス日: 2020 年 1 月 26 日. [オンライン]. 利用可能: <http://www.kanagawa.med.or.jp/ibukai/gakkoui/shikikakuijounitsuite201901.pdf>.
- [8] 京都府眼科学学校医会「先天色覚異常と色覚バリアフリー」, 2014. アクセス日: 2020 年 1 月 26 日. [オンライン]. 利用可能: <http://kyogan.org/sikikaku/color1-h2606.pdf>.
- [9] 石原恵子, 長町三生, 大崎紘一, 石原茂和, 辻昭雄「加齢に伴う水晶体黄変化による日常生活への影響」, 『人間工学』, 第 34 巻, 第 1 号, pp. 9–16, 1998, doi: <http://dx.doi.org/10.5100/jje.34.9>.
- [10] H. Brettel, F. Viénot, and J. D. Mollon, “Computerized simulation of color appearance for dichromats,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 10, pp. 2647–2655, 1997, doi: <http://dx.doi.org/10.1364/josaa.14.002647>.

- [11] 分析・計測・測位用アート開発 Labs「波長と色の関係 | 分析・計測・測位用アート開発 Labs | RTK モジュール・FPGA 基板の通販サイト」, 2019. アクセス日: 2020 年 1 月 26 日. [オンライン]. 利用可能: <https://www.fiber-light-source-labs.com/tech/198/>.
- [12] 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 (全 3 回) 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』, 第 21 巻, 第 9 号, pp. 1080–1104, 2002.
- [13] カラーユニバーサルデザイン推奨配色セット制作委員会『カラーユニバーサルデザイン推奨配色セットガイドブック』, 第 2 版. 大平印刷: 東京, 2018.
- [14] 日本理化学工業株式会社「ダストレス eye チョーク / 日本理化学工業株式会社」, 2020. アクセス日: 2020 年 1 月 26 日. [オンライン]. 利用可能: <https://www.rikagaku.co.jp/items/eyechalk.php>.
- [15] 中野豊「JIS・ISO・IEC の動向——改正 JIS Z 9101・JIS Z 9103 の概要及び解説」, 『セイフティダイジェスト』, 第 64 巻, 第 6 号, pp. 14–20, 2018.
- [16] 矢口博久「新連載: 色彩企画のこれから——CIE の最新動向から (2) 色差式の発展」, 『日本色彩学会誌』, 第 41 巻, 第 2 号, pp. 62–69, 2017.
- [17] J.-B. Huang, Y.-C. Tseng, S.-I. Wu, and S.-J. Wang, “Information preserving color transformation for protanopia and deuteranopia,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 711–714, 2007, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2007.898333>.
- [18] B. Funt and L. Zhu, “Colorization of dichromatic images,” *Int. Colour Assoc. Conf.*, pp. 1–6, 2018.
- [19] 矢口博久「新連載: 色彩企画のこれから——CIE の最新動向から (1) CIE 表色系の基本」, 『日本色彩学会誌』, 第 41 巻, 第 1 号, pp. 22–30, 2017.
- [20] 城戸今日子, 桂重仁, 佐藤雅之, 須長正治「黄青—明度平面における 2 色覚の色カテゴリ」, 『日本色彩学会誌』, 第 41 巻, 第 6 号, pp. 76–79, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.15048/jcsaj.41.6__76.
- [21] 城戸今日子, 桂重仁, 須長正治「2 色覚の混同色の黄青-明度平面への色カテゴリマッピング」, 『日本色彩学会誌』, 第 42 巻, 第 3 号, pp. 158–160, 2018, doi: http://dx.doi.org/10.15048/jcsaj.42.3__158.
- [22] A. R. Robertson, “The CIE 1976 color-difference formulae,” *Color Res. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 7–11, 1977, doi: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1520-6378.1977.tb00104.x>.

- [23] Adobe, “Adobe® RGB (1998) color image encoding,” 2005. Accessed: Jan. 26, 2020. [Online]. Available: <https://www.adobe.com/digitalimag/pdfs/AdobeRGB1998.pdf>.