

## 色覚異常者のカテゴリカル色知覚モデルの構築

矢田 紀子<sup>†1</sup> 白川 真一<sup>†1</sup>  
長尾 智晴<sup>†1</sup> 内川 恵二<sup>†2</sup>

筆者らはこれまでに、人間がもつカテゴリカル色知覚と色の恒常性の機能を備えたモデルを、ニューラルネットワークを用いて構築してきた。これらの研究では、心理物理実験結果を用いることで色覚正常者のカテゴリカル色知覚モデルを構築した。本研究では、色覚異常者の色知覚モデルを構築することを目的としている。色覚異常者の色知覚モデルを構築し、そのメカニズムを解析することで、人間の色覚メカニズムを考察することができると考えている。本報告では色覚異常者の心理物理実験結果をもとに、構造が任意のニューラルネットワークを GA によって最適化する FFFCN を用いて、モデルの構築を試みる。

### Construction of a Categorical Color Perception Model for Color Defects

NORIKO YATA,<sup>†1</sup> SHINICHI SHIRAKAWA,<sup>†1</sup> TOMOHARU NAGAO<sup>†1</sup>  
and KEIJI UCHIKAWA<sup>†2</sup>

The authors construct a model that can operate similarly to human categorical color perception and color constancy using particular structured neural network so far. In these studies, we construct categorical color perception model of normal color vision using the results of psychophysical experiments. The purpose of this study is to get a color perception model of color defects. We construct a color perception model of color defects, and analyze the mechanism, then we can prospect human color perception mechanism. We attempt to construct a color perception model of color defects based on the results of psychophysical experiments using FFFCN that optimizes the structure of neural network by GA.

#### 1. はじめに

我々人間は、色の微妙な違いを見分けることができる。一方、その色を他者に伝えようとするときには、赤青などのように色をいくつかのカテゴリにまとめて表現することが多い。これを色のカテゴリカル知覚という。この色のカテゴリの中には、誰もがよく用いる色があり、これを基本カテゴリ色という<sup>1)</sup>。また、我々人間は、環境光のスペクトルが変化しても物体の色を安定して知覚することができる。これを色恒常性という。ある物体の色が見えがどのカテゴリ色になるかは、その物体の反射光スペクトルだけではなく、周囲の環境にも影響され、色恒常性を伴って決まる。

筆者らは、特殊な構造をもつ4層のニューラルネットワークを用いて、複数の照明光の下で人間のカテゴリカル色知覚を測定した心理物理実験結果をもとに、

人間と同様な色恒常性を備えたカテゴリカル色知覚モデルを獲得した<sup>2)</sup>。また、このカテゴリカル色知覚モデルを用いてシーン中の色認識に適用し、人間と同じような色認識ができていたことを示した<sup>3)</sup>。これらの研究では、色覚正常者の心理物理実験結果を用いてモデルの構築を行った。

本報告では色覚異常者の心理物理実験結果を用いて、色覚異常者の色知覚モデルを構築することを目的とする。色覚異常者のカテゴリカル色知覚モデルを構築し、そのメカニズムを解析することで、人間の色覚メカニズムを知ることができると考えられる。

予備実験として、文献<sup>2)</sup>で提案したモデルを用いて、色覚異常者の色知覚モデルを構築したところ、十分なモデルを獲得することはできなかった。これは、先に提案したモデルでは構造に制限が大きいために、モデルが必要な構造を取れなかったことが一因であると考えられる。

そこで、本報告では、フィードフォワード型のニューラルネットワークを GA で最適化する、Feed Forward Flexibly Connected Neural Network (FFFCN) を用いて、色覚異常者のカテゴリカル色知覚モデルを獲得する。

<sup>†1</sup> 横浜国立大学大学院環境情報学府

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

<sup>†2</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

## 2. 色覚異常について

色覚異常は先天性と後天性に区分される。遺伝的素因によるものを先天性色覚異常という。また、先天性色覚異常を除いた眼疾患や心理的要素などによるすべての色覚異常を後天性色覚異常という。

先天性色覚異常の分類は一般に混色および等色に関する実験結果によるもので、すべてのスペクトル色光と等色するのに必要なスペクトル色光が何種類必要かによって決まる。1種類の色光ですべての波長のスペクトル色光と等色することが可能なのは一色型色覚、2種類の色光で可能なのは二色型色覚、3種類の色光で可能なのは三色型色覚である<sup>4)</sup>。

先天性色覚異常には、L錐体の欠落による第一色覚異常、M錐体の欠落による第二色覚異常、S錐体の欠落による第三色覚異常がある。このうち第三色覚異常はきわめてまれで、その頻度は1万～5万人に1人と推定され、常染色体優性遺伝の形式をとる。第一色覚異常と第二色覚異常はX染色体劣性遺伝で、その頻度は日本人男性で約5%、女性で約0.2%と非常に高い。また、日本人女性の約10%が保因者である。

正常および色覚異常の遺伝子、つまり網膜に混在するL、M、S錐体視物質の蛋白質を規定する遺伝子が明らかにされており<sup>5)6)</sup>、遺伝子検査により色覚異常の型を知ることができる。

本研究では、二色型第一色覚異常と二色型第二色覚異常を取り扱う。

## 3. Feed Forward Flexibly Connected Neural Network (FFFCN)

### 3.1 概要

従来のニューラルネットワークのほとんどは階層型や相互結合型などあらかじめ構造を決めてから、決められた学習方法を用いる場合がほとんどである。しかし、あらかじめ決められた構造で与えられた問題を必ず解けるとは限らない。これに対して、ニューラルネットワークの構造を決定する手法が数多く提案されている。また、ニューラルネットワークの適切な構造が未知の問題に対しては、構造と結合加重を同時に最適化することが有効と考えられる。そこで、ニューラルネットワークの構造を決定する手法として、遺伝的アルゴリズム (GA) 用いる手法も数多く研究されてきた。GAを用いてニューラルネットワークの構造と結合加重を自動決定する手法として、任意の結合構造をもつニューラルネットワークが獲得できる、Flexibly Connected Neural Network (FCN) が提案されている<sup>7)8)</sup>。FCNは主に不完全知覚問題を含むエージェントの行動制御に適用され、有効性を示している。また、FCNの各ユニットに特性をもたせることで、連続値空間上でのエージェント制御を可能とした、Real

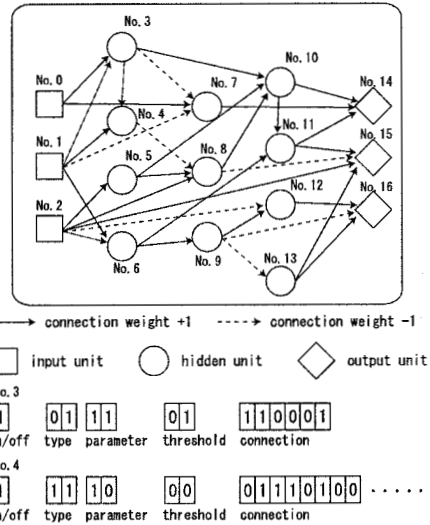


図1 FFCNの構造例  
 Fig. 1 An example of structure of FFCN.

valued FCN (FCN) が提案されている<sup>8)</sup>。

本報告ではこのRFCNを基に、構造をフィードフォワード型に制限したFeed Forward FCN (FFFCN)を用いて、色覚異常者のカテゴリカル色知覚モデルを構築する。

### 3.2 FFCNの構造

本報告で用いるFFFCNの構造ではフィードフォワード型に制限されたネットワーク構造を採用する。FFFCNの各ユニットは、フィードフォワード型に制限された接続だけ許され、ユニット間の結合加重としきい値には+1, 0, -1が用いられる。結合加重0は結合が存在しないことを表す。また、先に提案されているRFCNと同様に、FFFCNの各ユニットは独自の特性をもつ。本報告では、ユニットの入出力関数とパラメータについて異なるユニットを用いることができることとした。入出力関数としては、しきい値関数、シグモイド関数、線形関数、区分線形関数を用い、これらの関数のパラメータ値として0.25, 0.5, 1.0, 2.0を割り当てることができる。ただし、出力ユニットに関しては0.0～1.0の間の値を取る必要があるので、出力ユニットで使用できる関数はシグモイド関数と区分線形関数だけとした。結合加重は+1, 0, -1の単純な値だけしか取れないものの、ユニットの入出力関数やパラメータが異なることによって、様々な応答を示すユニットが表現可能である。これらの結合加重、しきい値、ユニットの特性を0, 1からなる遺伝子に変換し、GAによって最適化を行う。FFFCNの構造例を図1に示す。

### 3.3 FFCNの遺伝子表現と遺伝操作

ネットワーク構造は0, 1からなる遺伝子型に変換

され、遺伝操作が施される。FFFCNの染色体は0, 1の一次元のビット列で表現される。FFFCNのユニットは入力ユニット、中間ユニット、出力ユニットの順に番号が付けられており、各ユニットは自分の番号よりも若い番号のユニットとの結合だけ許される。なお、入力ユニット同士、出力ユニット同士の結合は禁止した。これによって、フィードバック結合のない任意のフィードフォワード結合をもつニューラルネットワークが表現可能である。例えば、図1の“No.3”のユニットは入力ユニット“No.0”～“No.2”までとの接続が許されており、“No.4”のユニットは“No.0”～“No.3”までのユニットとの接続が許される。染色体はユニットのon/off, しきい値, 入出力関数, パラメータ, 結合加重が順番に並べられたものである。なお、結合加重などの各値は0, 1にコーディングされ、染色体上に表現される。結合加重, しきい値については、“00”が1を“11”が+1を“01”と“10”が0の値を表す。結合加重の部分の染色体長は大きい番号のユニットほど他のユニットとの結合を指定する部分が多くなるため、長くなる。全体の中間ユニット数は固定とするため染色体長は固定であるが、各ユニットについてそのユニットが表現型に発現するか否かのon/offを表す遺伝子を入れているため、表現上はユニット数可変となる。

本報告では遺伝操作として交叉と突然変異を用いる。交叉は一様交叉を採用し、突然変異は突然変異確率  $P_m$  によって遺伝子単位で発生する。

#### 4. 色覚異常者のカテゴリカル色知覚モデルの構築

##### 4.1 カテゴリカルカラーネーミング実験

ここでは、色覚異常者のカテゴリカル色知覚特性を調べるために行ったカテゴリカルカラーネーミング実験について述べる。カテゴリカルカラーネーミングとは、被験者が呈示された色票の見えをもっとも良く表す色名を、11色の基本カテゴリ色の中から1個答える方法である。この実験では、呈示刺激としてOSA色票424枚を用いた。刺激は暗室内で天井からLCDプロジェクタによって照明され、マンセルN5の明るさの灰色のボード上に1枚ずつ呈示される。照明光が変化したときのカテゴリカル知覚の変化を調べるために、照明光には3種類の異なる照明光(3000K, 6500K, 25000K)を用いる。これらを照明光  $o, w, b$  と呼ぶ。

被験者は、それぞれの照明光に順応した状態で呈示される色票を見て、その色票の見えをもっとも良く表す色名を11個の基本色の中から1個答える。被験者は二色型第一色覚異常者3名(S1, S2, S3)と二色型第二色覚異常者2名(S4, S5)である。それぞれ色票424枚に対してのネーミングを1セッションとして、

表1 実験に用いた各パラメータ値  
Table 1 The parameters used in the experiments.

Parameter	Value
Generation alternation model	MGG
The number of generations	300000
Population size	150
Child size	30
Uniform crossover rate $P_c$	0.5
Crossover rate	0.7
Mutation rate $P_m$	0.001
The maximum number of units	50

\* Minimal Generation Gap<sup>9)</sup>

同一照明光で2回のセッションを行い、3照明光×2回=6セッションを行った。

##### 4.2 FFFCNによるモデルの獲得

FFFCNを用いて色覚異常者に対するカテゴリカルカラーネーミング実験の結果を学習し、色覚異常者の色知覚モデルを獲得する。ただし、色覚異常者のカテゴリカル色知覚特性は個人差が大きく現れたことから、被験者毎に別々にモデルを獲得する。教師データセットはカテゴリカルカラーネーミング実験の結果を基に作成する。入力データは、サンプル色のCIE(1931)  $xy$ 色度( $x, y$ )と輝度  $Lum$  から求めたL, M, S錐体応答値と、そのときの照明光色の色度から輝度  $Lum$  を一定値として求めたL, M, S錐体応答値の計6個の値を用いる。ただし、入力データをセットする入力ユニットは、第一色覚異常のモデルの場合にはL錐体以外、第二色覚異常の場合にはM錐体以外の2種類だけを用いる。つまり、入力ユニットは色覚異常者のモデルの場合4ユニットとなる。また出力ユニットは、11ユニットからなり、各ユニットが11色の基本カテゴリ色にそれぞれ対応している。教師データには、カテゴリカルカラーネーミング実験で得られた結果の、ある色票の見えに対してある基本色名が何度用いられたかを表す色名使用比率を、 $[0, 1]$ に正規化した値を用いる。教師データセットには、3照明光×424枚=1272セットを用意した。

GAで用いる適応度関数は出力値に対して、正解率と誤差に重みを加えたものを用いた。本実験で使用した適応度関数は次の式(1)で示される。

$$fitness = 10 \times \frac{n_{correct}}{N_{data}} + (1 - \frac{Error}{N_{data}}) \quad (1)$$

ここで、 $N_{data}$ は教師データ数、 $n_{correct}$ は正解したデータ数、 $Error$ はネットワークが出力した出力値と教師データの出力値(色名使用比率)の誤差である。

本実験で使用したGAのパラメータを表1に示す。

##### 4.3 獲得したモデルの検証

FFFCNを用いて被験者S1~S5の5名に対するカテゴリカルカラーネーミング実験の結果を教師データとして、被験者毎に学習した。S1, S2, S3は第一色覚異常、S4とS5は第二色覚異常である。各被験者毎

表 2 被験者毎の FFFCN の正解率  
Table 2 The number of correct answer for each subject using FFFCN.

	o	w	b	total
S1 (第一異常)	74.3%	88.0%	80.7%	81.0%
S2 (第一異常)	73.1%	75.7%	75.9%	74.9%
S3 (第一異常)	62.7%	69.8%	70.5%	67.7%
S4 (第二異常)	71.7%	75.5%	82.8%	76.7%
S5 (第二異常)	69.8%	81.6%	78.1%	76.5%
Average	70.3%	78.1%	77.6%	75.4%

に FFFCN の最適化を行い、得られたネットワークの出力値の正解率を表 2 に示す。各被験者に対して、7 割以上の正解率を獲得することができた。これは構造をあらかじめ決定したニューラルネットワークを用いて行った実験の結果と比べると高い値であった。得られた色知覚モデルの出力と心理物理実験結果から得られた教師データを比較すると、教師データの色知覚を実現できていることが確認できた。

今回の色覚異常者の色知覚モデルの獲得実験では設定として、2 種類の錐体応答だけから色名を答えなければならぬ。このため、非常に難しい問題設定であると考えられる。特に、被験者 S3 の心理物理実験の結果を見ると、L 錐体が欠如している第一色覚異常であるにもかかわらず、赤緑方向の色の違いを識別することができていた。このことから実際の色覚異常者の色知覚においては、これら以外の情報も何かしらの方法で用いて色知覚を行っているのではないかと考えられる。

## 5. まとめ

本報告では色覚異常者のカテゴリカルカラーネーミング実験の結果を教師データとして、色覚異常者の色知覚モデルを FFFCN によって構築した。その結果、高い正解率を示すモデルを獲得することができた。

今後は、得られたモデルの頑健性を検証することが必要であると考えている。また、得られた色覚異常者の色知覚モデルを解析し、色知覚メカニズムを考察することや、より精度の高いモデルを考案する予定である。さらに、FFFNCN を用いて色覚正常者の色知覚モデルを獲得し、解析することも考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) Berlin, B. and Kay, P.: *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*, University of California Press, Berkley (1969).
- 2) 矢田紀子, 長尾智晴, 内川恵二: ニューラルネットワークによるカテゴリカル色知覚モデル, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.12, pp.1809-1815 (2005).
- 3) 矢田紀子, 長尾智晴, 内川恵二: Neural Network によるカテゴリカル色知覚を用いたシーン中の色

認識, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用 (TOM20), Vol.49, No.SIG 20 (2008).

- 4) 太田安雄, 清水金郎: 色覚と色覚異常, 金原出版, 東京, 改訂第二版 edition (1992).
- 5) Nathans, J., Thomas, D. and Hogness, D.S.: Molecular genetics of human color vision: The genes encoding blue, green and red pigments, *Science*, Vol.232, No.4747, pp.193-202 (1986).
- 6) Nathans, J., Piantanida, T.P., Eddy, R.L., Shows, T.B. and Hogness, D.S.: Molecular genetics of inherited variation in human color vision, *Science*, Vol.232, No.4747, pp.203-210 (1986).
- 7) 田澤和子, 長尾智晴: 任意構造神経回路網 FCN による自律エージェントの行動制御, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp.991-1000 (2004).
- 8) 白川真一, 長尾智晴: RFCN による連続値空間上での自律エージェントの行動制御, 電気学会論文誌 C, Vol.128, No.5, pp.762-769 (2007).
- 9) 佐藤 浩, 小野 功, 小林重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp.734-744 (1997).