

最近の技術から

ニューラルネットワークによる色情報の解析

臼井 支朗・中内 茂樹

豊橋技術科学大学情報工学系 〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1

1. まえがき

色覚研究の歴史は古く、18世紀の Newton による一連の研究により、感覚論から近代実験科学への転機を迎えたといわれている。色はそれを感ずる側の内部に創り上げられるものであり、対象物に色があるのではない。こうした認識は古くからあったが、それを実証する手段を持たなかった。20世紀に入り、ようやく色覚現象とその実態である神経回路との対応が、網膜、視覚中枢に対する生理学的研究により着実に明らかにされてきた。しかし、現在のところ、神経回路の働きに還元できる色覚現象はほんのわずかであり、それを理解する十分な知見は未だ得られていない。

一方、最近、情報処理という観点から、神経回路の機能や計算原理の解明を目指す動きがある。ニューラルネットワークは、認知科学と脳・神経科学の接点ともいうべき情報表現・処理アルゴリズムに焦点を当て提案されたものである。脳内では色情報は多重に広がった多様体を形成していると考えられており、ニューラルネットワークはその解析に新しい方法論を与えるとともに、学問分野の壁を越えたグローバルな色覚研究の原動力になり得る可能性を秘めている。

本稿では、階層型ニューラルネットの学習機能を色情報の内部表現を同定する問題に適用し、色の識別と色情報変換の関係について情報処理の観点から述べる。

2. モデル構造と学習

色覚の最初のステップは、異なる分光感度特性を持つ3種の錐体による光受容である。19世紀にすでに網膜には3種の光受容器が存在するであろうことは予想されていたが、20世紀に入ってようやく生理学的実証を得た。一方、1980年、Zeki¹⁾によりV4野で特定の色に選択的に反応する細胞が発見された。それぞれの細胞は、ある特定の波長に最大感度を示し、そのチューニングカーブが錐体に比べかなりシャープなことが特徴である。しかも、最大感度を示す波長が可視波長全域に分布している。

これは、色情報が分散表現と局所表現の中間的な形態で表現されていることを示唆するものであり興味深い。

それでは、3種の錐体からの信号がどのようにしてこのようなV4野色細胞の応答に変換されるのであろうか。その場合、どのような色情報表現が用いられているのであろうか。われわれは、錐体からV4野色細胞までの過程をニューラルネットによりモデル化するため、図1に示した入力ユニットを3種の錐体に、出力ユニットを色細胞に対応させた3層ニューラルネットを構築した。

入力ユニットは、図1(a)に示すような短波長、中波長、長波長帯にそれぞれ応答ピークを持つ3種の錐体²⁾に対応させた。また、出力ユニットは、連続スペクトル光が7色に見えるという現象に着目し、それらの色(波長)に選択的に応答する仮想的な色細胞として定義した。なお、これらのユニットには、色細胞の特性に対応させ図1(b)に示すシャープなスペクトル応答特性を持たせた。これらの特性のピーク波長、および波長幅は、波長と色名の関係を参考にそれぞれ各色光の波長範囲の中心波長および波長範囲の80%とした。そこで、380 nmから780 nmについて5 nmごとの81単波長光を本モデルに入力し、これらに対する7個の色細胞出力ユニットの応答値を教師データとして、バックプロパゲーション学習法によりネットワークの学習を行った。なお、中間ユニット数を決定する一般的な方法は知られていないため、ここではまず、冗長性をもたせ15個として学習させた。

3. 学習結果の分析

学習後のネットワークの特性を調べるために、混色光に対する各中間ユニットの応答を求めた。さらに、これらのユニットが弁別不可能な色(ユニットの応答量が同じとなる色)を色度図上で結んだ軌跡、すなわち混同色軌跡に着目し、各中間ユニットの機能分類を行った。混同色軌跡の角度は、中間ユニットの入力空間に対する選択性を評価するための、重要な特徴と考えることができる。この混同色軌跡と垂直方向の色の違いを最も弁別す

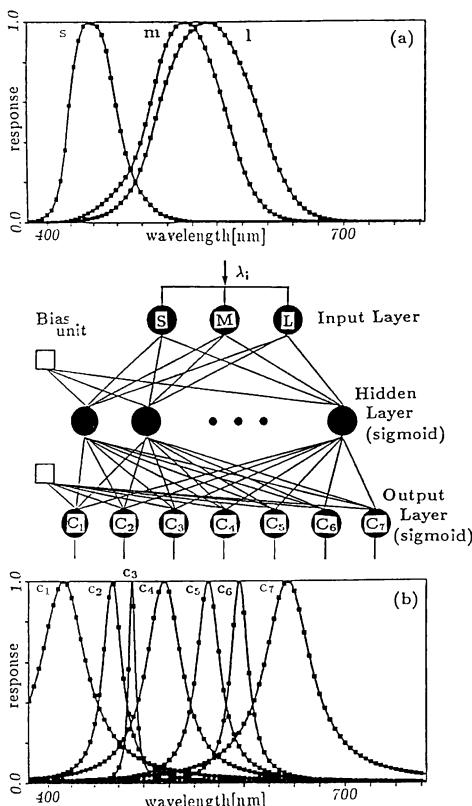


図 1 色覚のニューラルネットモデル
(a)入力ユニットのスペクトル応答特性、(b)出力ユニットのスペクトル応答特性。点は学習点を示す。

ことができる。

図 2(a)にこれらの中間ユニットが獲得した混同色軌跡の角度分布を平均値、標準偏差と共に xy 色度図に示す。これらの中間ユニットの混同色軌跡は、大きく二つの角度に集中していることがわかる。一方、混同色軌跡についての生理実験がマカクザルの外側膝状体神経細胞について行われている³⁾。この実験結果によれば、図 2(b)に示すように、これら神経細胞の混同色軌跡の角度は赤-緑、黄-青という反対色に対応する 2 方向に集中して分布しており、ニューラルネットの場合と酷似していることがわかる。

4. 得られた色情報表現の性質

以上、中間ユニット数の冗長性に着目し、その機能を統計的に分類した結果、これらが反対色性を有することを示した。次にこうした性質が中間ユニット数に依存するか、中間ユニット数の異なるモデルの内部表現を調べた。その結果、中間ユニット数によらず、どのモデルの

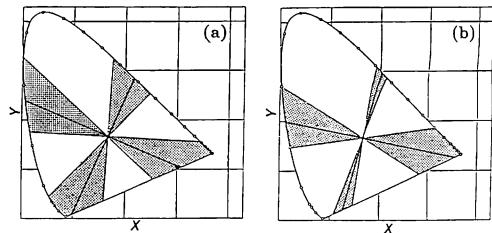


図 2 混同色軌跡の分布
(a)ニューラルネットモデル、(b)マカクザル外側膝状体ニューロン³⁾。ハッチングは標準偏差を示す。

内部表現も反対色性を示し、特に、中間ユニット数が 2 個の場合、これらのユニットのスペクトル応答特性は互いに直交することがわかった。さらに、出力ユニット数を変化させた場合にも、基本的に内部表現の反対色性は保存されることが確認された。

外側膝状体は網膜と大脳皮質の中継点にあたり、情報伝送の点からいえばそこがボトルネックになると考えられる。従って、網膜で受容された情報は圧縮された形でそこに表現されていると考えられ、色情報といえばそれがちょうど反対色信号に対応することをこれらの結果は示している。反対色は、Hering らによって現象が先行する形で発見されたものではあったが、情報伝送の効率化というもう一つの重要な侧面を持っているのである。

5. む　す　び

本稿で示したニューラルネットによる計算論的な研究と生理学的な知見を融合した新しいアプローチは、非常に多くの神経細胞の応答パターンとして表現されている視覚情報とその処理メカニズムを統合的に解釈するための有効な方法の一つであろう。特に、色の恒常性、色と形の情報統合など、高次視中枢特有の情報処理・表現を明らかにするためには、こうしたモデルによる研究方法が有効である。また、その知見を基礎にしたインテリジェントカラーデバイスなど、工学的実現の方向を探ることにより、感覚情報処理という従来技術が苦手としていた領域に新しい道が開けるものと考えている。

文　献

- 1) S. M. Zeki: "The representation of colours in the cerebral cortex," *Nature*, **284** (1980) 412-418.
- 2) V. C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivities of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vision Res.*, **15** (1975) 161-171.
- 3) A. M. Derrington, J. Krauskopf and P. Lennie: "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque," *J. Physiol.*, **357** (1984) 241-265.

(1991年7月30日受理)