

ICAによる初期視覚の空間分光特性を持つ受容野の自己組織的形成[†]

土肥 英三郎¹ 乾 敏郎^{1,2}

¹ 京都大学大学院文学研究科

² 同 情報学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

doi@cog.ist.i.kyoto-u.ac.jp inui@cog.ist.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし：自然な視覚環境の下では形態情報と色情報は確率的に独立であると考えられる。従って視覚系における形態情報と色情報の分離はその確率的独立性に基づいている可能性がある。本研究では視覚環境に対する錐体モザイク配列の応答を学習サンプルとして作成し、これを確率的に独立な表現へ変換するフィルタ(受容野)を独立成分分析(ICA)によって求めた。その結果、L錐体とM錐体から構成されるガボール型の受容野と同時に、分光選択性の高い反対色型の受容野も形成された。後者には空間的な拮抗領域の有無も存在した。

キーワード：ICA、自然画像、錐体モザイク、V1、空間分光特性、自己組織化

Self-organization of spatio-chromatic receptive fields in the early visual system by ICA

Eizaburo Doi¹ Toshio Inui^{1,2}

¹Graduate School of Letters,

²Graduate School of Informatics, Kyoto University

Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

doi@cog.ist.i.kyoto-u.ac.jp inui@cog.ist.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract : In the natural visual environment, form and color seem to be statistically independent. It is therefore possible that the separation of form and color in the visual system is based on their statistical independence. In this study we generated a set of learning samples that is the response of cones in the cone-mosaic arrangement to the natural visual environment. We then calculated the filters(receptive fields) that transform the samples to a statistically independent representation using Independent Component Analysis(ICA). In the resulting filters, there are color-opponent receptive fields with high spectral sensitivities, as well as Gabor-like receptive fields consisting of both L- and M-cones. In the former, some filters also have spatial opponency, and some don't.

key words : ICA, natural image, cone-mosaic, V1, spatio-chromatic property, self-organization

[†]電子情報通信学会技術研究報告(NC研究会1999年3月)提出原稿

1 はじめに

第1次視覚野(V1)には線分様の刺激に高い応答を示す単純型細胞が存在する。この細胞が従う符号化原理の仮説として視覚入力に含まれる高次元長度の削減が提案されており [1]、その妥当性が計算機シミュレーションによって示されている [2][3][4]。

この符号化原理は本来初期視覚一般を対象としたものであるが、これまでのシミュレーション研究では色情報を含まないグレースケールの自然画像を視覚入力として使っており、従ってその対象も空間特性に限られていた。高次元長さ削減が初期視覚の普遍的な符号化原理であれば、V1細胞の空間分光特性も同じ枠組みで説明できるはずである。

本研究は視覚環境に対する錐体モザイク配列の応答(以下錐体モザイク応答)を視覚入力として導入し、それに対する高次元長さ削減過程を独立成分分析(ICA)によって求めたものである。以下、第2章で実験条件と研究目的を説明し、錐体モザイク応答に対する高次元長さ削減過程の解釈を行う。第3章で結果を示し、第4章で本研究の問題点や今後の展望について述べる。

2 目的と方法

本研究の方法は錐体モザイク応答を除いて Bell と Sejnowski[3] に従っている。以下の説明では、視覚入力としてグレースケールの自然画像を用いる条件 [2][3][4] をグレースケール条件、錐体モザイク応答を用いる条件を錐体モザイク条件と呼ぶことにする。

2.1 神経回路の構造

神経回路は入力層と出力層の2層で構成し、各層の細胞数は同一とする。入力層の出力を x 、出力層の内部状態を u 、入出力細胞間の荷重を W とおくと、入出力関係は

$$u = Wx \quad (1)$$

で表される。ここで W の第 i 行ベクトル w_i^T は出力細胞 i の受容野に相当する(図1)。入力層は網膜上の錐体配列に対応し、分光特性の異なる3種類の錐体をモザイク的に配置する。出力細胞に関しては視覚刺激に対して線形応答を示す細胞という以上の生物学的対応は構築によって与えられないが、そのような細胞はV1以前の階層に存在することが知られており [4][5]、従って初期視覚系の細胞を想定したことになる。

2.2 錐体モザイク応答

錐体の配列は網膜偏心度に依存するので、本研究では中心窩を想定して錐体種の比率を $L : M : S = 10 : 5 : 1$ [6]、その配置を S 錐体に関しては六方格子状、 L 錐体と M 錐体はランダムとした [7]。

錐体モザイク応答の作成方法は次の通りである(図2)。カラー画像の分光特性が既知のシステムを使って主に植物を被写体とする自然画像を撮影し(RGB画像)、錐体の分光特性を持つ画像に変換する(LMS画像)。実際の実験ではこのような画像データとして約 600×800 ピクセルの画像5枚を使用した。

視覚入力のサンプルは上記の画像を 12×12 ピクセルの小領域で切り出して作成する。これは出力細胞が 12×12 ピクセルの小窓を通して外界を覗いていることに相当する。錐体モザイク応答はLMS画像から切り出した小領域を図2(c)に示したモザイクパターンでマスクし、加え合わせることで得られる。ここで錐体1つをピクセル1つに対応させていることに注意する。このようにして約2万個の錐体モザイク応答を作成し、ICAの学習サンプルとする。

なお、LMS画像は輝度に対して線形であるが、実験ではヒストグラム平坦化法によってコントラストを強調した画像を用いた [9]。また、錐体モザイク条件との比較のため、同一の画像データに基づくグレースケール条件の実験も行った。

2.3 問題の要点

本研究の要点は、第1に、視覚入力一般に成立しうる高次元長さ削減原理の妥当性を検証するため、シミュレーション実験における視覚入力のパラメータを空間特性以外に拡張することである。我々は空間分光特性に関して検討することを目的に錐体モザイク応答を導入するが、これは実験条件の設定として適切であると考えられる。

第2に、錐体の種類や位置に関する情報が明示的に与えられていない条件下で受容野を形成させる点である。例えば色に関する情報を錐体モザイク応答 x から計算するためには、その要素 x_i が3種類の錐体のどれに起因するもの

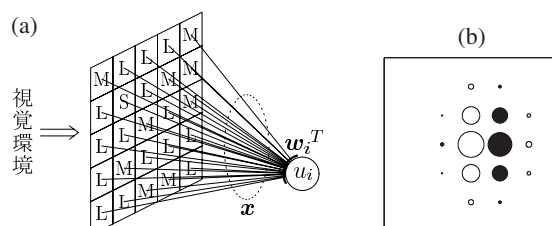


図1: 1つの出力細胞 i に対する入出力関係を (a) に示す。荷重(受容野) w_i^T の各成分は錐体1つ1つに対応しているため、錐体配列に対して視覚化できる。荷重の値の正負を白丸と黒丸で、大きさを面積で表すと、 w_i^T は (b) のように表される。本稿では受容野の図示にこの方法を用いる。

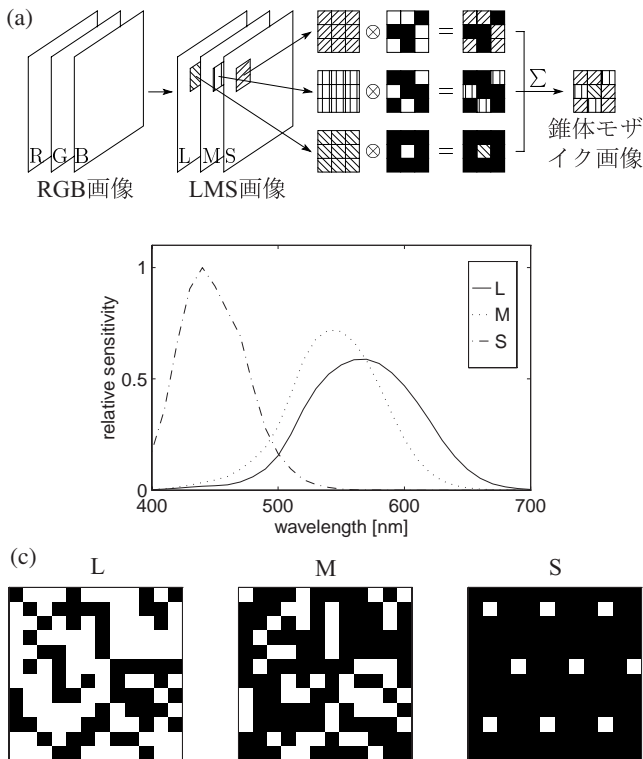


図 2: (a) 錐体モザイク応答の作成方法 . (b) 錐体の分光感度特性 (Smith & Pokorny, 1975[8]) . (c) 使用した錐体モザイクパターン . 該当の錐体を白抜きで示す . 錐体の頻度は 12×12 ピクセルに対して $L : M : S = 87 : 48 : 9 \approx 10 : 5 : 1$ である .

なのかを知る必要があり、これは受容野の規則的、合目的な構造に反映することになる . 本研究ではそのような受容野が、錐体の種類と位置に関する情報を神経回路の構造や学習則に与えない条件下で、錐体応答の統計的規則性だけを手掛かりに獲得される状況を考えているのである . これは、初期視覚系の中でも網膜や LGN の細胞のように解剖学的な規則性を持つ単純な受容野では当てはまらないと考えられるが [7]、V1 は錐体と解剖学的に距離があり、比較的不規則な細胞構築を持ち、受容野の形成が活動依存的で、また、空間特性の環境適応性も示されており [2][3][4]、適切かつ妥当な問題設定と言えるだろう .

第 3 に、受容野の空間特性と分光特性を同時に解釈することが可能である . 受容野は通常図 1(b) のように網膜面 (視野) に対してプロットされ、これに分光特性を書き込めば図 3(a) のようになる . しかし厳密に考えれば受容野は錐体モザイク配列に対してプロットされるべきであり (図 3(b))、これによって分光特性がモザイク的な空間分布をとることが顕在化する . ここで強調しておきたいことは、モザイク的な空間分光特性を持つ受容野の応答には、必然的に空間情報と分光情報が混じり合っているということである . そのような受容野はボトムアップ的に理解することが難しい [10] . 本研究では錐体モザイク応答を単にある種の構造を持つ確率情報源とみなし、それに対して一般的な符号化原理を展開することで、受容野の複雑な構造を直接扱うことなくその合理性や妥当性を検討することが可能で

ある . 即ち、高次元冗長削減原理という仮説に基づいて受容野を形成させ、その結果と視覚系に関する実験データとの比較を通して仮説の検討を行う . このように、トップダウン的に議論を行い、符号化原理の実現であるところの受容野レベルで議論しないことが、空間分光特性の問題に対しては有効であると思われる .

第 4 に、視覚機能の環境適応性が挙げられる . これは視覚系が種または個体の生息圏に特化した機能を持つという考えである .

第 5 に、そのような機能が個体発生の段階で適応的・自己組織的に形成される可能性に対して検証可能な枠組みを与える . 実験条件としては生育環境の相違、特定の錐体種の欠損が考えられる .

2.4 高次元冗長削減の解釈

ICA は高次元冗長を削減する線形フィルタ (以下 IC フィルタ) の作成手法で、これによって独立成分を基底とする情報表現へ変換することができる . ここで独立成分とはサンプル x を 1 組の基底 $\{a_1, \dots, a_N\}$ で展開したときの展開係数 $(u_1, \dots, u_N)^T = u$ を確率変数と考えたとき、これが確率的に独立になるような基底のことで、実はサンプル中に存在する冗長なパターンに他ならない . 言い換えれば、サンプル中によくあるパターンを基底として使う符号化である .

ここで $[a_1, \dots, a_N] = A$ とおくと

$$u = A^{-1}x \quad (2)$$

であり、 $W = [w_1, \dots, w_N]^T = A^{-1}$ とおけば、展開係数 u_i は出力細胞 i の内部状態に対応する (図 1(a)、式 (1) 参照) . 従って、独立成分による表現とは出力細胞の応答が互いに確率的に独立になる状況を指す .

また、フィルタ $\{w_i^T\}$ は基底 $\{a_i\}$ の双対基底であり、

$$w_i^T a_j = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

が成り立つ . つまり a_i は w_i^T だけが応答するパターンであることを意味している . これは受容野を解釈する上で

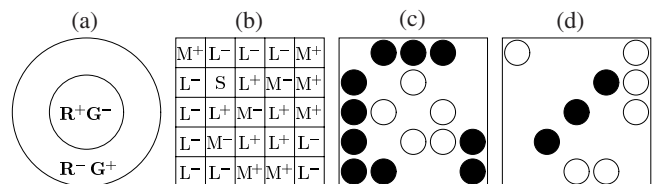


図 3: 同心円型二重反対色細胞の慣例的な図 (a) と、錐体モザイク配列を考慮した図 (b) . (a) では 1 つの位置が L 錐体と M 錐体によって多重にサンプリングされている印象を与えるが、実際には (b) のようにモザイク的である . L 錐体、M 錐体だけを示すとそれぞれ (c)、(d) のように中心周辺型の受容野になり、同時にプロットするよりも構造が分かりやすい .

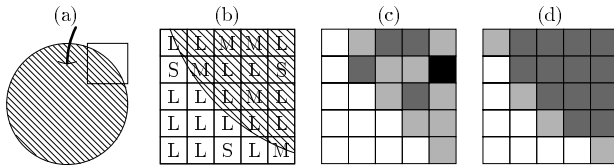


図4: 錐体モザイク応答に内在する冗長なパターン. 外界の像 (a) は網膜上に投影され、3種類の錐体のモザイク的な配列によってサンプリングされる (b). (a) を白地にリングと見ると、錐体モザイク応答は (c) のようになり、グレースケールで考えた視覚入力 (d) とは異なる冗長性を持つことが分かる (本文参照).

微妙な問題を含んでいる. 受容野の機能はその形状から類推するのが一般的であり、これは受容野の最適刺激がその形状そのものであることによる. 一方、ある細胞だけが応答するパターンによってその符号を解釈することも理にかなっており、これが上に述べた独立成分 (双対基底) による解釈である. 一組の受容野が直交性を満たす場合、フィルタと基底は定数倍を除いて一致するので2つの解釈は一致するが、そうでない場合には解釈に差が生じることになる. IC フィルタには直交性は保証されておらず、この問題に直面することになるが、本稿では両方の解釈を行なうことにする. 但しこの問題はあくまでフィルタ出力が視覚の後段階においてどのように利用または解釈されているかに関する議論であり、符号化原理の妥当性はICフィルタと視覚系の受容野との比較によってなされる.

さて、先行研究ではグレースケール条件における独立成分が領域の境界 (エッジ) や線分様のパターンであり、そのICフィルタが単純型細胞に類似の空間特性を持つことを報告している [3][4]. つまり、自然画像に含まれる冗長なパターンであるエッジや線分を基底とすることで高次元冗長性の削減された表現が得られ、それに対応するICフィルタが単純型細胞の受容野に類似しているということは、単純型細胞の従う符号化原理が高次元冗長性削減であることを示唆している.

同様に考えれば、錐体モザイク応答をサンプルとした場合の独立成分として次の2種類の基底が予想できる. 1つはグレースケールと同様なエッジや線分様のパターンで、これは視覚環境に生起するパターンの多くが放射エネルギーの差として捉えられ、そこには錐体の種類に依存しない成分が存在するという推論に基づいている. もう1つは分光分布の相異に関係する成分で、これは種類の同じ錐体がまとまった挙動を示すと考えられる (図4). これらの基底に対応するICフィルタとしては、基底から類推して、錐体種に依存しない空間パターンを捉えるフィルタと、錐体種に依存するフィルタの2種類が考えられる.

2.5 ICA アルゴリズムの概要

独立成分の累積密度関数を g 、出力細胞の内部状態 u_i を g で変換したものを $y_i = g(u_i)$ とおくと、 y の結合エント

ロピー $H(y)$ を最大化する W を求めることで、入力 $\{x\}$ に対する出力 $\{u\}$ の高次元冗長性を最小化するICフィルタを求めることができる [11].

ここで錐体モザイク応答の独立成分は不可知であり、その累積密度関数 g を適当に仮定する必要がある [3]. グレースケール画像を使ったこれまでの研究では、単純型受容野の自然画像に対する応答ヒストグラムに基づいて、独立成分の確率分布として高い尖度を仮定している [1]. 本研究ではICフィルタとして必ずしも単純型受容野を想定していないが、先行研究との相異を明確にするため、この点に関しては同一の条件を使うことにする. 即ち、 g の近似としてロジスティック関数 f を仮定する:

$$y_i = f(u_i) = \frac{1}{1 + \exp(-u_i)} \quad (4)$$

$H(y)$ を最大化する W は、 $H(y)$ の勾配にしたがって W を更新することで求められる:

$$\Delta W \propto \frac{\partial H(y)}{\partial W} W^T W \quad (5)$$

但し勾配を自然勾配で評価するため $W^T W$ を乗じている [12]. 式 (5) を整理して荷重の要素について書き下すと次のようになる:

$$\Delta w_{ij} \propto w_{ij} + (1 - 2y_i) \sum_k w_{kj} u_k \quad (6)$$

ここで w_{ij} は入力細胞 j と出力細胞 i の間の荷重である. \sum の項は出力層全体の内部状態 u が入力細胞 j との荷重 $w_{.j}$ を介して w_{ij} に影響していることを意味しており、非局所的な計算である. これは上記の学習則が実際の脳では実装されていないことを示唆するものであるが、本研究では符号化原理の検証を当面の目的とし、アルゴリズムの検討は行わなかった.

なお、実際の実験ではシミュレーションの計算速度を早める目的で学習サンプルの白色化を行った. これはICフィルタの性質自体には影響を及ぼさないが、冗長性削減の階層的实现として興味深い問題を含んでいる.

3 結果

錐体モザイク条件で形成された合計144個のICフィルタは、フィルタの形状、周波数特性、分光特性に基づいて表1に示す4種類に分類できた.

ガボール型のICフィルタの例を図5に示す. このタイプはL錐体とM錐体から構成されており、これらの錐体の区別は見られなかった. このことはフィルタの形状にL、M錐体のモザイク配列が反映していないことである. その一方で、S錐体に対応する荷重は一貫して値が小さく、ガボールフィルタと見なした時に大きな荷重を持つはずの位置にS錐体に対応する場合でも、その荷重は0に近い値

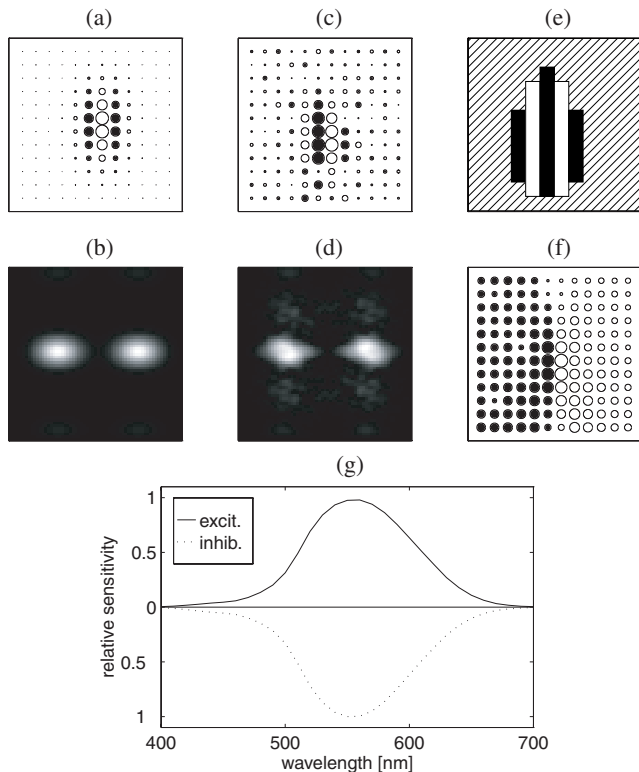


図 5：単純型受容野の数理モデルであるガボールフィルタ (a) とその周波数応答 (b) . ガボール様の IC フィルタの例 (c) とその周波数応答 (d) . この IC フィルタをガボールフィルタと見なして興奮領域 (白) と抑制領域 (黒) に分割したとき (e) , 各領域の分光特性は (g) のようになる . (f) には基底を示す . 基底は錐体配列の応答パターンに含まれる成分なので、受容野同様、錐体配列に対して視覚化して示す .

をとる明確な傾向が見られた . 図 5(c) に示した例でも抑制領域の下側に不連続な点があるが (10 行 6 列目) , ここは S 錐体の位置に対応している (図 2 参照) . 以上の傾向は (g) に示した分光特性が L 錐体と M 錐体の同符号の和で表され、S 錐体の寄与がほとんどないことも分かる . この分光特性は比視感度とほぼ一致する .

この IC フィルタはガボールフィルタと酷似しており、単純型の受容野と考えることができる . この種のフィルタはグレースケール条件でも形成されたものであり [3][4]、視覚入力に含まれる空間パターンの符号化に関係していると考えられる . ここでこのフィルタの最適刺激は局所的な正弦波パターンであり、局所的な周波数分析の基礎と考えられるが、(f) に示した基底はまさにエッジ状のパターンであり、視覚入力 x にこのようなエッジ状の成分が含まれ

表 1：IC フィルタの分類結果

分類	頻度	%
ガボール型	81	56.3
二重反対色 L/M 拮抗型	6	4.2
二重反対色 S/LM 拮抗型	8	5.6
全域型	3	2.1
その他 (未分類など)	46	31.9
合計	144	100.0

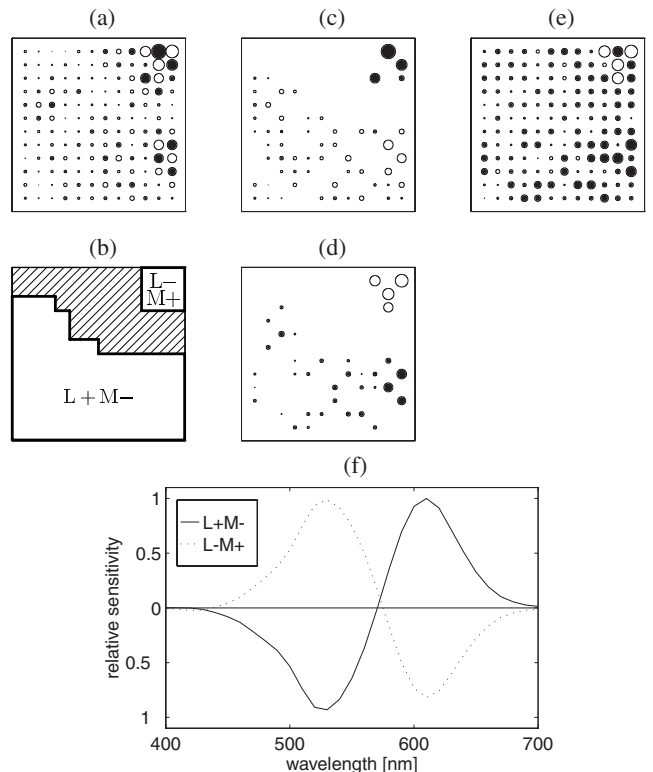


図 6：二重反対色 L/M 拮抗型に分類した IC フィルタ (a) . L 錐体と M 錐体が互いに逆符号を持つような領域を (b) に示し、そこに含まれる L 錐体と M 錐体をそれぞれ (c) , (d) に示す . (b) に示した 2 領域の分光感度曲線を (f) に示す . (e) には基底を示す . フィルタと類似の傾向を持つことが分かる .

ていることをこのフィルタ出力が符号化していると解釈される .

錐体モザイク条件ではグレースケール条件では見られなかった受容野がいくつか見いだされた . これらを詳細に分析すると、ガボール型において L、M 錐体が協調し、S 錐体の寄与がほとんどなかったことは対照的に、一定領域内で異種錐体が逆符号を持つ、いわゆる反対色型の受容野であることが分かった . この中には空間的な拮抗領域を持つ二重反対色型と、 12×12 ピクセルのサンプル領域全体に有効な荷重を持つ全域型が存在し、前者は更に L 錐体と M 錐体が拮抗したもの (L/M 拮抗型) と、S 錐体と L、M 錐体が拮抗したもの (S/LM 拮抗型) に分類することができた .

図 6 に L/M 拮抗型の IC フィルタを示す . (a) を見ると、ガボール型の場合のように明瞭な構造は存在せず、ある種の高域通過フィルタとも考えられるが、この不規則なパターンには錐体モザイク配列が反映されており、L 錐体と M 錐体を別々にプロットすると、それぞれの錐体に関して一貫した傾向を持つ領域が存在することが分かる ((b)~(d)) . (b) に示した 2 つの領域の分光特性を調べてみると、分光選択性が高く、2 つの分光感度曲線はちょうど逆符号の関係にあることが分かる . ここでも S 錐体はほとんど寄与していない . 各曲線の 2 つのピークは赤と緑の領域に存在しており、R/G チャネルに対応すると考えられ

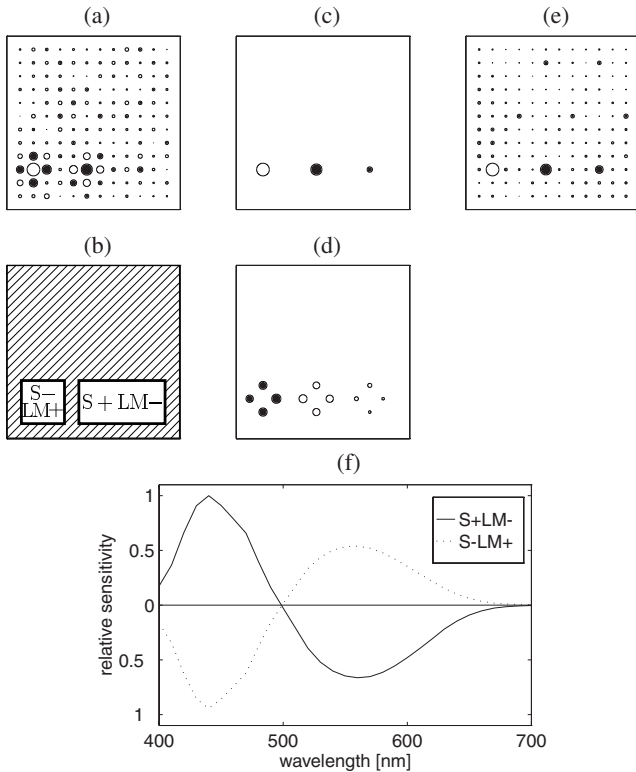


図 7: 二重反対色 S/LM 拮抗型の IC フィルタ (a) . S 錐体を中心に規則的な構造が見られる . 荷重の大きい S 錐体を (c) に、その 4 近傍 (L もしくは M 錐体に対応) を (d) に示す . これに基づいて、受容野の構造を (b) のように見なした . (b) に示した 2 つの領域の分光感度曲線を (f) に示す . 基底 (e) はフィルタより滑らかなパターンとなっているが、全体的な傾向は類似している .

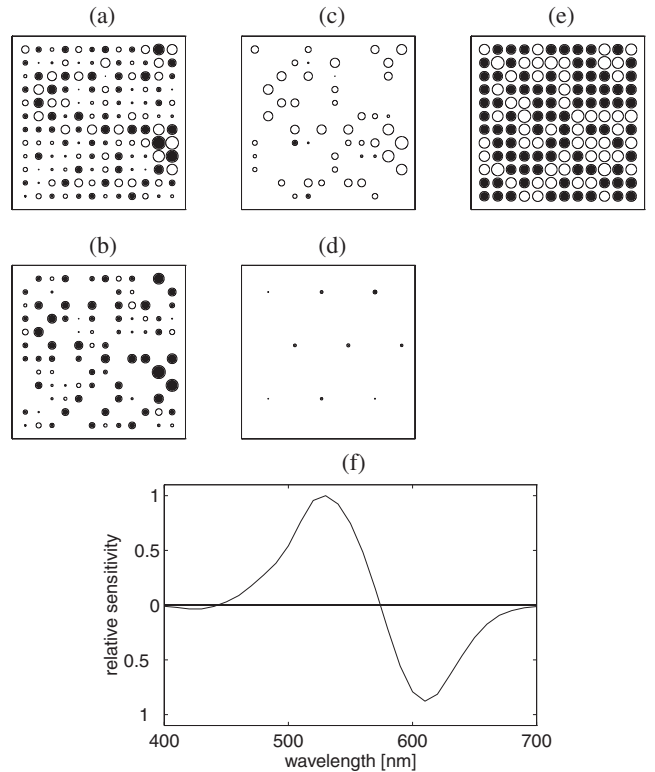


図 8: 全域型 (II 型) の IC フィルタ (a) . これを錐体別にプロットすると、L 錐体 (b) 、M 錐体 (c) 、S 錐体 (d) となる . このフィルタの分光特性は (f) のようになる . (b)~(d) から分かるように、このフィルタの分光特性は実質的に L^-M^+ である . S 錐体は値は小さいが全て L 錐体と同符号である . (e) に示す基底では、L・S 錐体と M 錐体が完全に拮抗している .

る [5] .

この IC フィルタは 2 つの領域間の赤と緑のコントラストに対して選択的に応答し、白色光 (均一な分光分布を持つ光) のコントラストに対しては応答しないという特徴を持つ . 基底も大体同様の傾向を示しており、いずれの解釈でも 2 領域の中・長波長のコントラストを符号化していると考えられる .

もう 1 つの二重反対色型である S/LM 拮抗型の IC フィルタを図 7 に示す . このタイプは L 錐体と M 錐体が協調して S 錐体と拮抗する傾向を持つ ((b)~(d)) . (b) に示した 2 つの領域の分光特性を調べてみると、青と黄の領域に選択的な応答特性を示し、Y/B チャンネルに対応すると考えられる [5] . このフィルタも L/M 拮抗型と同様、2 つの領域間の分光分布のコントラストを符号化していると考えられる .

全域型の IC フィルタを図 8 に示す . これは上に示したどの IC フィルタとも異なり、有効な荷重が 12×12 のサンプル領域全体に一樣に分布している . 図 8 に示した例では領域全体で L 錐体と M 錐体が拮抗しており、S 錐体は小さい値ながら L 錐体と同調している ((a)~(d)) . 基底 (e) を見ると、L 錐体と S 錐体の位置が全て正、M 錐体の位置が全て負となっており、フィルタの傾向と一致する . 従ってこのフィルタはサンプル領域全体における中波長の比率

を符号化していると考えられる .

全域型のフィルタは 3 個存在した . その分光特性をまとめて図 9 に示す . このうちの 2 つ (#1 と #2) は領域内で錐体が拮抗し、白色光を通さないため、電気生理学の分類における II 型に対応すると考えられる . 残りの 1 つは白色光を通す直流フィルタである . グレースケール条件においてもこのフィルタが 1 つだけ形成されている [3] . 全域型のフィルタが錐体モザイク条件で 3 個、グレースケール条件で 1 個形成されたのは、分光特性に関する自由度 (錐体の種類の数) に依存していると考えられる . つまり、錐体モザイク条件では、分散光に関する放射エネルギーとそ

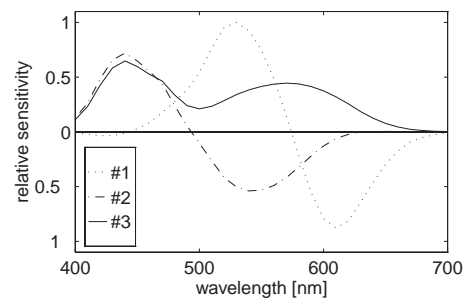


図 9: 全域型フィルタ 3 個の分光感度曲線 . 図 8 のフィルタは #1 である . #2 は S^+M^- 、#3 は L^+S^+ で表され、#3 だけが白色光を通す .

の分光分布をこれら 3 つの組み合わせで表現していると考えられる。

全体的な傾向としては、ガボール型が 56% と最も頻度が高く、錐体モザイク条件で初めて見いだされた細胞 (二重反対色型と II 型) は合計 11% と低頻度であった。電気生理学的実験によると二重反対色細胞の頻度はおよそ 10% 程度と概算されており [13]、これは本研究の 9.7% と一致する。

4 議論

以上の結果は視覚入力の高次元冗長度削減を実現する線形フィルタと V1 の空間分光特性との類似を示しており、V1 細胞が従う符号化原理として高次元冗長度削減が妥当であることを示唆している。また、視覚入力だけを手掛かりとして初期視覚の受容野が導かれたことは、実際の受容野の形成過程が視覚入力に依存した活動依存のかつ環境適応的なものである可能性を示すものといえる。

以下、本研究に派生するいくつかの問題を議論する。

4.1 形態・色チャネルとの対応

V1 の 2、3 層には分光選択性が低く方位選択性の高い細胞と分光選択性が高く方位選択性の低い細胞がそれぞれブロップ間とブロップ内に分離しており [13]、形態チャネルと色チャネルの解剖学的基礎と考えられている。錐体モザイク条件で形成された IC フィルタもそのような 2 群に分類でき、形態チャネルと色チャネルの物理的基礎が視覚入力の確率的構造であることを示唆している。

このことは独立成分で解釈することができる。2.4 節で述べたように、錐体モザイク応答の独立成分としては錐体の分光特性にほとんど依存しない放射エネルギーの空間分布に起因するパターンと、錐体の分光特性が直接関係する放射エネルギーの分光分布に基づくパターンの 2 種類が考えられる。実際に生成した独立成分はこの推論を基本的に支持していると言える。但し、S 錐体と L・M 錐体が互いに独立に振る舞う傾向も存在し、これは IC フィルタにおいて全種類の錐体が寄与する広帯域型の分光特性が形成されなかったことに反映した。具体的には、ガボール型に S 錐体が寄与していないことや、二重反対色型に広帯域の領域が形成されなかったことが挙げられる。これはサンプルの選びかたにも依存する問題であり、電気生理学的データとの対応も含めて慎重に検討する必要がある。

錐体の二次元配列によって形態情報と色情報を得ようとするとき、2 つの精度を同時に高めることは不可能である。色情報を重視すれば分光分布の異なる複数の錐体を使うことになるが、これは空間情報の精度を落とすことにつながる。逆に形態情報を重視すれば、究極的には一種類の錐体を使うことになり、色情報は欠落する。ここで、ヒトやマ

カクの視覚系はこの 2 つの情報を同時に、しかし空間情報に比重を置いて抽出するために、分光特性が非常に近い L、M 錐体と、分光特性が大きく異なる S 錐体を進化させてきたという解釈が成り立つ。ここでは S 錐体の比率だけが極端に低い。これによると、L 錐体と M 錐体の分光特性が近いのはオプシン分子が進化の途上であるからではなく、積極的な適応的意義が考えられる [14]。つまり、L 錐体と M 錐体は、空間特性を捉えるには分光特性が十分近く、しかし分光情報を捉えるだけの差異は保たれているのである。この仮説に基づけば、形態チャネルが L・M 錐体だけで構成されていることも理解できる。

4.2 生理学データとの対応

ガボール型の IC フィルタの周波数選択性はサンプルのピクセル間隔に起因するナイキスト周波数に偏っており、視覚系が複数の周波数チャネルから構成されているという知見と一致しない [15]。これはグレースケール条件でも指摘されていた問題である [3][4]。また、二重反対色型の形状は、同心円型であると考えするにはサンプル領域が小さすぎる。これらの問題は実験条件に起因する可能性もあり、現在サンプル画像の性質やその大きさの再検討を行なっている。

4.3 初期視覚の階層構造と段階的な冗長度削減

本研究では画像サンプルのコントラストを上げる目的でヒストグラム平滑化法を使用した。これは画像強度の平均値と適当な非線形関数を用いれば近似的に同様の効果を実現できる。非線形関数は画像強度の累積密度関数に近いほど良い。これは単一細胞レベルで可能な冗長度削減 (出力ヒストグラムの平坦化) であり、錐体の順応を想定することができる。

また、画像サンプルの白色化 (2 次元冗長度の削減) も行なったが、これは錐体 1 つの興奮性入力とその近傍の抑制性入力で構成される中心周辺型受容野で実現することが知られている [3]。これは神経節細胞や LGN の受容野特性と酷似している [7]。

以上のことは、本研究で使用した前処理が実際の視覚系における最初期段階の処理とよく符合することを示している。また、どの段階も冗長度削減という統一的な枠組みで捉えることができ、処理が進むにつれて複雑さが増すことも興味深い点である。即ち、単一細胞で可能なレベルから、局所的かつ解剖学的な規則だけで実現可能な受容野 [7]、その後、自由度が高く環境依存的な受容野が続くことになる。

4.4 検討課題

第1にサンプルの選択に関する問題がある。結果がサンプルに依存するため、視覚入力として本質的な要素が欠落していないサンプルを作成する必要がある。例えば眼球光学系や眼球微動に伴う画像のボケを取り入れるべきで、これによって周波数選択性が変化するはずである。また、サンプルの大きさを 12×12 より大きくすることで、多重解像度解析的な IC フィルタの形成や二重反対色型の形状が明瞭になることが期待される。

第2に非線形関数 f の仮定に関する問題がある。本研究では色選択的な細胞の応答ヒストグラムを考慮せずにロジスティック関数を仮定したが、同心円型の二重反対色細胞の応答ヒストグラムは負の尖度を持つ可能性がある。また、本研究の趣旨にはスパース表現の要請は存在しない。現在我々は f を sub-gaussian の累積密度関数とする条件で検討を行なっている。

第3に、overcomplete basis set による表現を検討している。これは N 次元の入力を N より大きい次元で表現するもので、グレースケール条件では既に多重解像度的な基底が導かれることが示されている [16]。色表現に関しても V1 以降で色選択性の高い非線形過程が観察されていることから [5]、この種の表現変換が実際おきている可能性は高いと考えている。

4.5 まとめ

以上、初期視覚の空間分光特性が視覚入力の高次元長度削減によって説明される可能性をシミュレーション実験に基づいて検討した。本研究の結果はこの仮説を肯定するものであり、特に形態チャンネルと色チャンネルの形成という機能的側面が導かれた点が重要であると考えている。今後は本稿に示した問題点を解決していくことで、より厳密な検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] D.J. Field. What is the goal of sensory coding? *Neural Computation*, Vol. 6, pp. 559–601, 1994.
- [2] B.A. Olshausen and D.J. Field. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images. *Nature*, Vol. 381, pp. 197–198, 1996.
- [3] A.J. Bell and T.J. Sejnowski. The “independent components” of natural scenes are edge filters. *Vision Research*, Vol. 37, No. 23, pp. 3327–3338, 1997.
- [4] J.H. van Hateren and A. van der Schaaf. Independent filters of natural images compared with simple cells in primary visual cortex. *Proc.R.Soc.Lond.B*, Vol. 265, pp. 359–366, 1998.
- [5] H. Komatsu. Mechanisms of central color vision. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 8, pp. 503–508, 1998.
- [6] R.L. DeValois and K.K. DeValois. A multi-stage color model. *Vision Research*, Vol. 33, pp. 1053–1065, 1993.
- [7] P. Lennie, P.W. Haake, and D.R. Williams. The design of chromatically opponent receptive fields. In Michael S. Landy and J. Anthony Movshon, editors, *Computational models of visual processing*. The MIT Press, 1991.
- [8] 色彩科学ハンドブック 第2版. 東京大学出版会, 1998.
- [9] 画像解析ハンドブック. 東京大学出版会, 1991.
- [10] D. Marr. ビジョン. 産業図書, 1987. 乾 安藤 訳.
- [11] J-P. Nadal and N. Parga. Non linear neurons in the low noise limit: a factorial code maximises information transfer. *Network*, Vol. 5, pp. 565–581, 1994.
- [12] S. Amari, A. Cichocki, and H.H. Yang. A new learning algorithm for blind signal separation. In *Advances in neural information processing systems*, Vol. 8, pp. 757–763. The MIT Press, 1996.
- [13] M.S. Livingstone and D.H. Hubel. Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex. *Journal of Neuroscience*, Vol. 4, pp. 309–356, 1984.
- [14] S-K. Shyue, D. Hewett-Emmett, H.G. Sperling, D.M. Hunt, J.K. Bowmaker, J.D. Mollon, and W-H. Li. Adaptive evolution of color vision genes in higher primates. *Science*, Vol. 269, pp. 1265–1267, 1995.
- [15] H.R. Wilson, D.K. McFarlane, and G.C. Phillips. Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking. *Vision Research*, Vol. 23, pp. 873–882, 1983.
- [16] B.A. Olshausen and D.J. Field. Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1? *Vision Research*, Vol. 37, No. 23, pp. 3311–3325, 1997.