

1次視覚野における皮質拡大の自己組織化

高木, 智史 / TAKAGI, Tomofumi

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

56

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2015-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00011242>

1 次視覚野における皮質拡大の自己組織化

Self-organization of cortical magnification in the primary visual cortex

高木智史

Tomofumi TAKAGI

指導教員 平原誠

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

The visual system is composed of various visual cortices, from low-order to high-order ones. Orientation-selective cells are found in the primary visual cortex. The primary visual cortex has several structural characteristics such as cortical magnification, retinotopy, and orientation column. The aim of this study is to provide a model in which cortical magnification is formed in a self-organized manner through learning by simple cells in the primary visual cortex and to evaluate the performance of the model by numerical experimentations.

Key Words : cortical magnification, retinotopy, orientation column

1. はじめに

脳の視覚系は低次から高次まで多様な視覚野から構成されている。1 次視覚野では方位選択性を持つ細胞があることが知られている。1 次視覚野の構造上の特徴としては皮質拡大、レチノトピーおよび方位コラムがあげられる。本研究では、1 次視覚野における単純型細胞の学習により、自己組織的に皮質拡大を形成するモデルを提案し、数値実験により動作確認することを目的とする。

2. 網膜から 1 次視覚野までの経路

図 1 に網膜が光刺激を受け取ってから外側膝状体に至るまでの経路を示す。

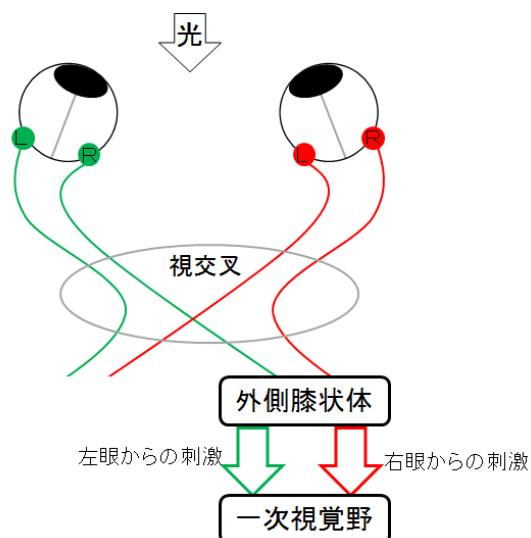


図 1 網膜から 1 次視覚野までの経路

物体からの光線は、両眼の網膜にぶつかる。それぞれの網膜の左側は視野の右半分を担当し、右側は視野の左半分を担当する。網膜に与えられた入力刺激の情報は、視交叉を経由し、外側膝状体へ到達する。左右それぞれの外側膝状体は両眼からの入力を受け、一次視覚野へと出力する。

3. 1 次視覚野の特徴

(1) 単純型細胞

1 次視覚野には網膜上の特定の領域に明暗の境界線がかかったとき、しかもその境界線の傾きが特定の方位を向いていたときにだけ反応する単純型細胞と呼ばれる細胞がある。単純型細胞の受容野は ON 領域と OFF 領域が並んだ構造をもつ。この単純型細胞は ON 領域にちょうど合うような入力刺激に対して強く反応し、逆に OFF 領域に入力刺激がかかるとき、反応が弱まる。

図 2 は単純型細胞の受容野の一例であり、3 通りの入力刺激を受けた場合を示している。赤と青の領域はそれぞれ ON 領域と OFF 領域を表し、線分は入力刺激である。図 2 A は ON 領域の方位（最適方位）に合った入力刺激が与えられた場合であり、この単純型細胞はもっとも強く反応する。A の入力刺激が最適方位であるのに対し、B の入力刺激は最適方位に対して若干傾いている。また、C の入力刺激は最適方位に完全一致した方位を持つものの、OFF 領域に位置するため、ほぼ反応しない。よって入力刺激 $A > B > C$ の順に強く反応する。

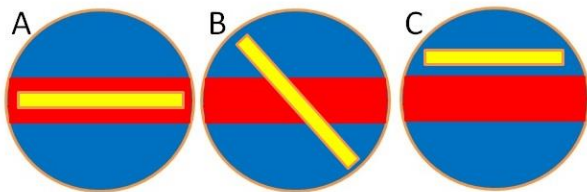
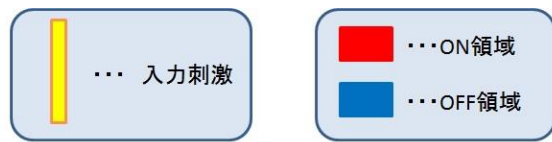


図2 多様な入力刺激を受けた受容野の例

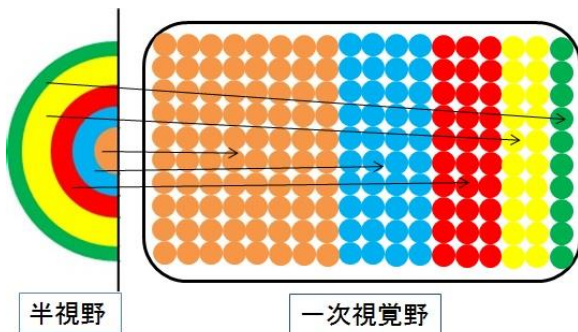


図3 1次視覚野の特徴

(2) レチノトピー

視野に写った刺激は網膜から外側膝状体を通り、1次視覚野へ伝わる。図3に視野と1次視覚野との対応関係を示す。図3左の半円は左半視野を、右図の長方形は右脳の1次視覚野を表しており、1次視覚野へ刺激が伝わった後に反応する単純型細胞の領域のイメージを色ごとに表示している。図3左の半視野における視野位置と右図の1次視覚野での細胞の並びには対応関係があり、視野の中心を担う細胞から周辺を担う細胞へなだらかに切り替わっている。このように網膜の特定部位が1次視覚野の特定部位に空間的な隣接関係を保ったまま結びついていることをレチノトピーという。

(3) 皮質拡大

図3左の半視野において中心部（茶色）の領域はとても狭いが、右図のそれに対応する細胞（茶色）の数は非常に多い。このように1次視覚野の細胞の数は視野位置と関係があることが知られている。視野の中心付近の処理を担う細胞の数は周辺を担う細胞の数に比べて著しく多いことを皮質拡大という。

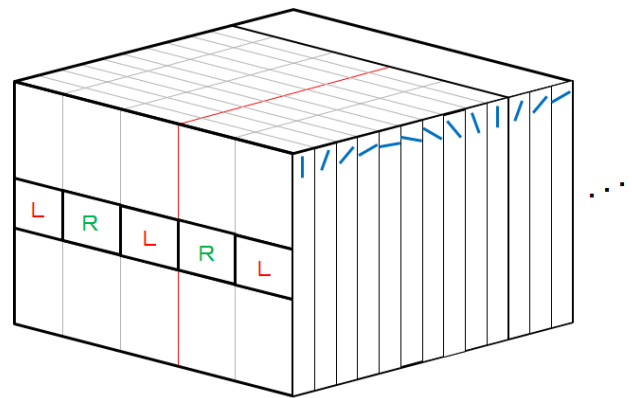


図4 方位コラムのイメージ図

(4) 方位コラム

図4に方位コラムのイメージを示す。右側面の線分はコラム内の細胞の最適方位を示している。

1次視覚野において単純型細胞は無秩序に分布せず配列している。受容野の最適方位が連続的に変化することが生理実験[1]にて確認されており、このまとまりを方位コラムという。この構造は大腦皮質の表面から深部に向けて柱状に構成されている。

4. 学習モデル

本研究で提案する学習モデルには、入力パターン群をその類似度に応じて分類する能力を自律的に獲得していく自己組織化マップ（SOM）を用いる[2]。なお、本研究では単眼視におけるモデルを扱うものとする。

(1) 入力刺激

2次元空間内に乱数で2点を選び、それを結んだ線分を $n \times n$ の画像に変換する。図5左は半視野を表しており、赤い点は注視点、黄色の線分は入力刺激とする。

網膜上の刺激は外側膝状体を通り1次視覚野へ届く。網膜の中心から遠い領域を担う外側膝状体の細胞の受容野は、中心に近い領域を担う細胞の受容野と比べて大きいことが知られている。そのため、外側膝状体から1次視覚野への入力とは図5右のように周辺領域がぼけた入力として伝わると思う。このため画像にガウシアンフィルタを掛けたものを入力刺激としてモデルに入力することとする。

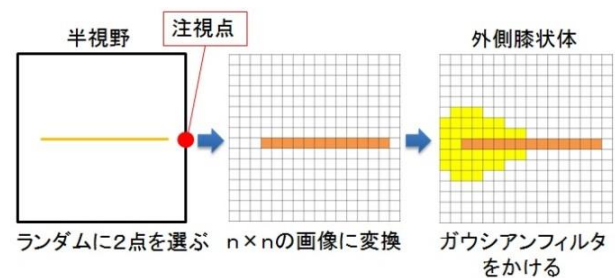


図5 入力刺激の作成

(2) 学習

モデルは1次視野野を想定した $m \times m$ 個の単純型細胞 u_{ij} ($i, j=1, \dots, m$) からなる1次視野野層を持ち、各細胞は入力刺激 $\{x_{kl}\}$ ($k, l=1, \dots, n$) に結びついている。それらの結びつき強度を参照ベクトル $\{w_{ijkl}\}$ と呼ぶ。

Step1:初期化

繰り返し数を T とし、 $t=0$ とする。参照ベクトルの各要素を0から1の間の乱数で初期化する。

Step2:繰り返し

$t=1, 2, \dots, T$ に対して次の操作を繰り返す

Step:2-1

入力刺激と参照ベクトルとの距離 d_{ij} を求める。

$$d_{ij} = \sum_{kl} (x_{kl} - w_{ijkl})^2 \quad (1)$$

Step:2-2

d_{ij} を最小とする単純型細胞 u_{ij} を勝者とする。

$$\{I, J\} = \operatorname{argmin}_{ij} d_{ij} \quad (2)$$

Step:2-3

参照ベクトルを次式により更新する。

$$w_{ijkl} \leftarrow w_{ijkl} + \varepsilon(t) h((i, j), (I, J), t) (x_{kl} - w_{ijkl}) \quad (3)$$

$$h((i, j), (I, J), t) = \exp\left\{-\frac{(i-I)^2 + (j-J)^2}{2\sigma(t)^2}\right\} \quad (4)$$

学習係数 $\varepsilon(t)$ は1よりも小さな値で初期設定し、時刻 t にともなって単調減少する。 h は近傍関数と呼ばれ、勝者である単純型細胞 u_{IJ} との距離に応じて単調減少する。また、 $\sigma(t)^2$ は時刻 t にともなって単調減少する。

5. 実験結果と考察

入力画像 $n \times n=12 \times 12$ 、細胞数 $m \times m=40 \times 40$ 、学習係数 $\varepsilon(t)=0.1$ 、 $\sigma(t)^2=1.0$ に設定した。なお、 $\varepsilon(t)$ と $\sigma(t)^2$ は単調減少する。1千万回繰り返し学習した結果を以下に示す。

図6, 7は学習後の単純型細胞の参照ベクトルであり、要素が1に近づくほど明るく、0に近づくほど暗くなるように表示している。図6は視野の中心を担う細胞の参照ベクトルであり、方位選択性が強く、縦線分を最適方位としていることがわかる。図7は視野の周辺を担う細胞の参照ベクトルであり、方位選択性は弱いが左下部に選択性があることがわかる。

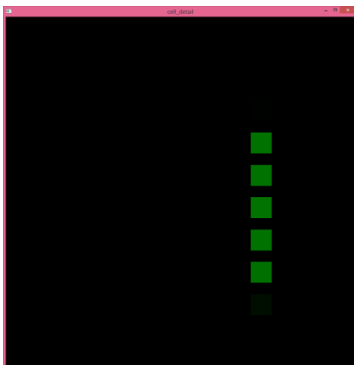


図6 視野の中心を担う単純型細胞の参照ベクトル

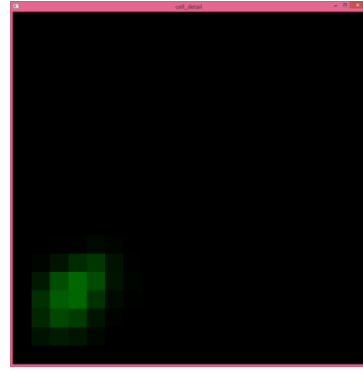


図7 視野の周辺を担う単純型細胞の参照ベクトル

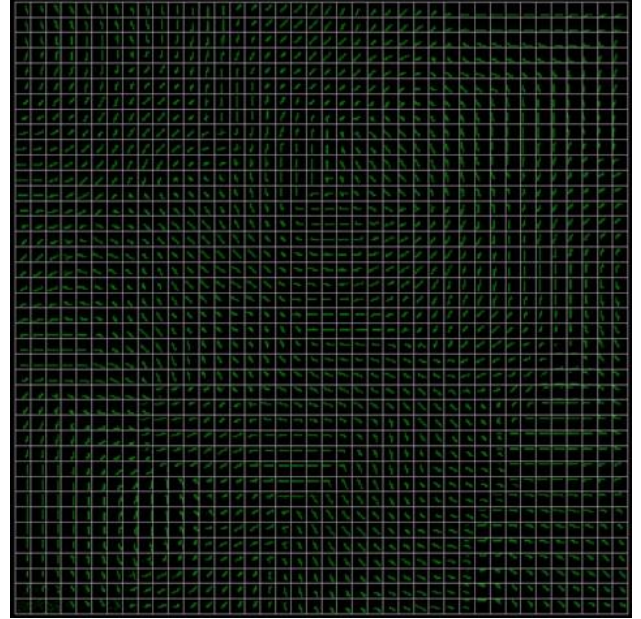


図8 格子状に並んだ1次視野野層

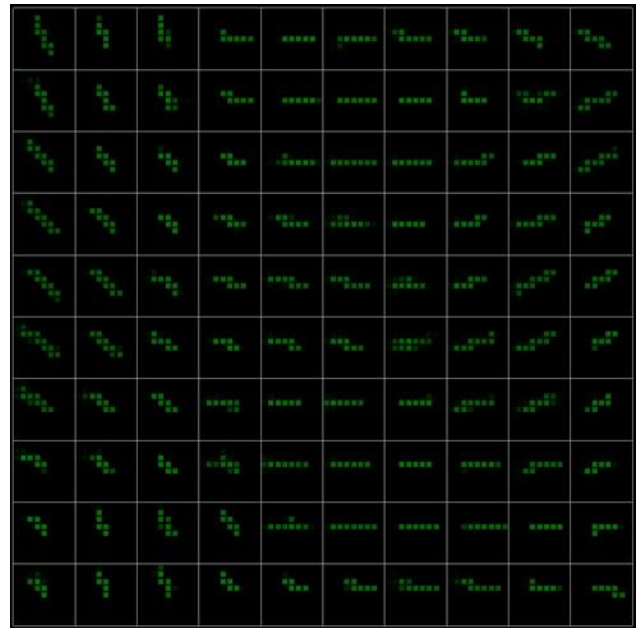


図9 図8の拡大図

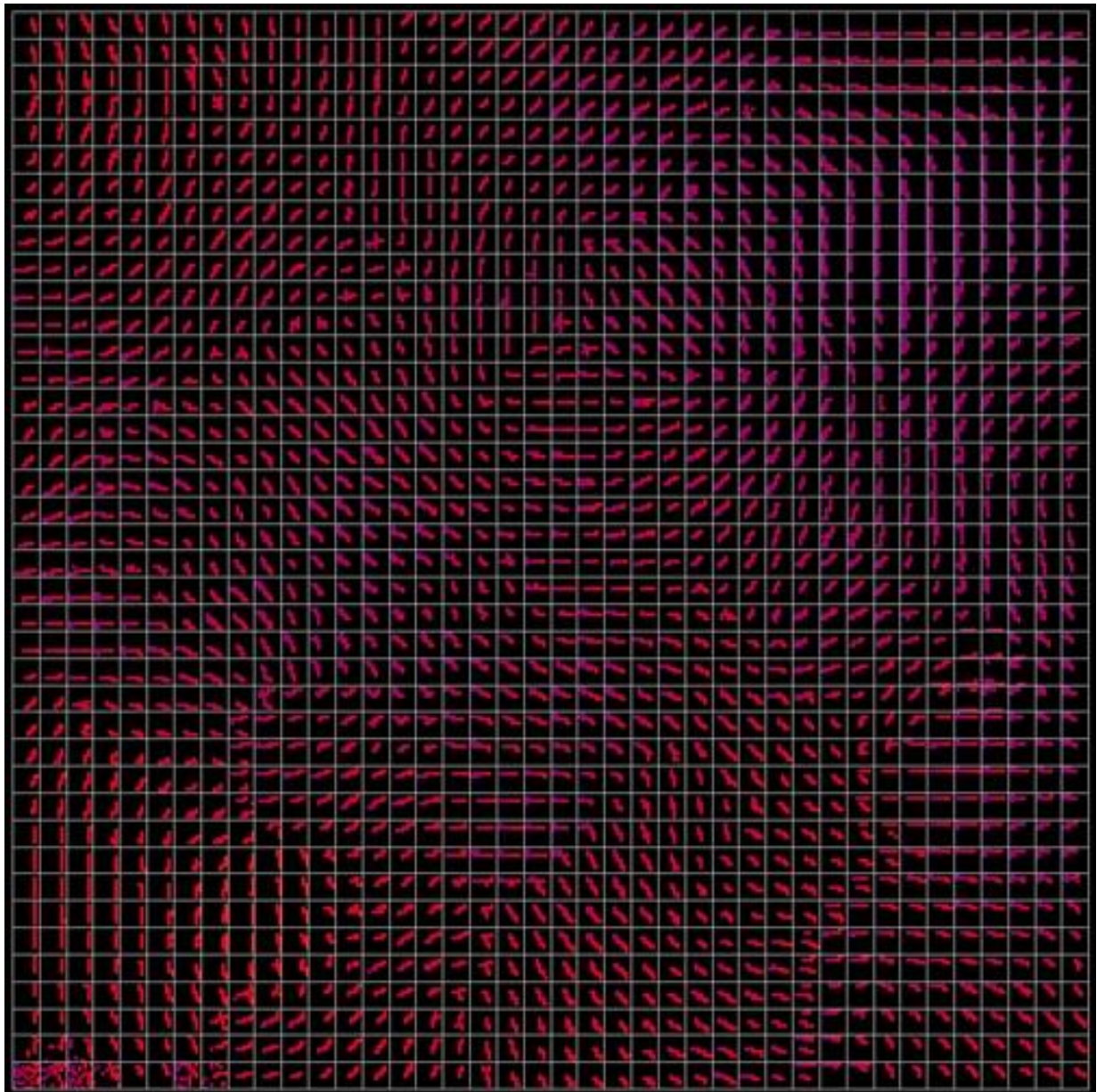


図 1 0 細胞の反応する網膜上の領域

図 8 は単純型細胞の参照ベクトルを格子状に並べたものであり, 図 9 はその中心付近を拡大したものである. 図 9 中央の細胞は最適方位が水平方向の受容野を持ち, 細胞の位置が右へいくにつれ最適方位が右肩上がりになっていく. また細胞の位置が中央から左下へいくにつれ最適方位が右肩下がりになっていくことが確認できる. 受容野の最適方位が連続的に変化していることから方位コラムが再現できている.

図 1 0 は細胞が担当する領域を表した図である. 視野の中心を担う細胞は赤く, 担う領域が周辺になるにつれて青く表示している. 視野の中心部を担う細胞数は多く, 視野の周辺部を担う細胞数は少なくなっており, 皮質拡大が再現できている.

しかし, 中心を担う細胞群と周辺を担う細胞群がなだ

らかに中心から周辺へ切り替わっているとは言い難く. レチノトピーが再現できていない. 細胞を 2 次元配列に並べ学習を行った結果, 端に位置する細胞は中心付近の細胞に比べて他の細胞の影響を受けにくいため, 学習初期に端の細胞が担う視野位置が決まり, 固定化されてしまったためだと考えられる. そのため学習初期には視野の周辺領域の入力刺激しか与えず, 周辺領域を担う細胞が決定した後に中心領域の入力も含めた学習を行った. その結果を図 1 1 に示す.

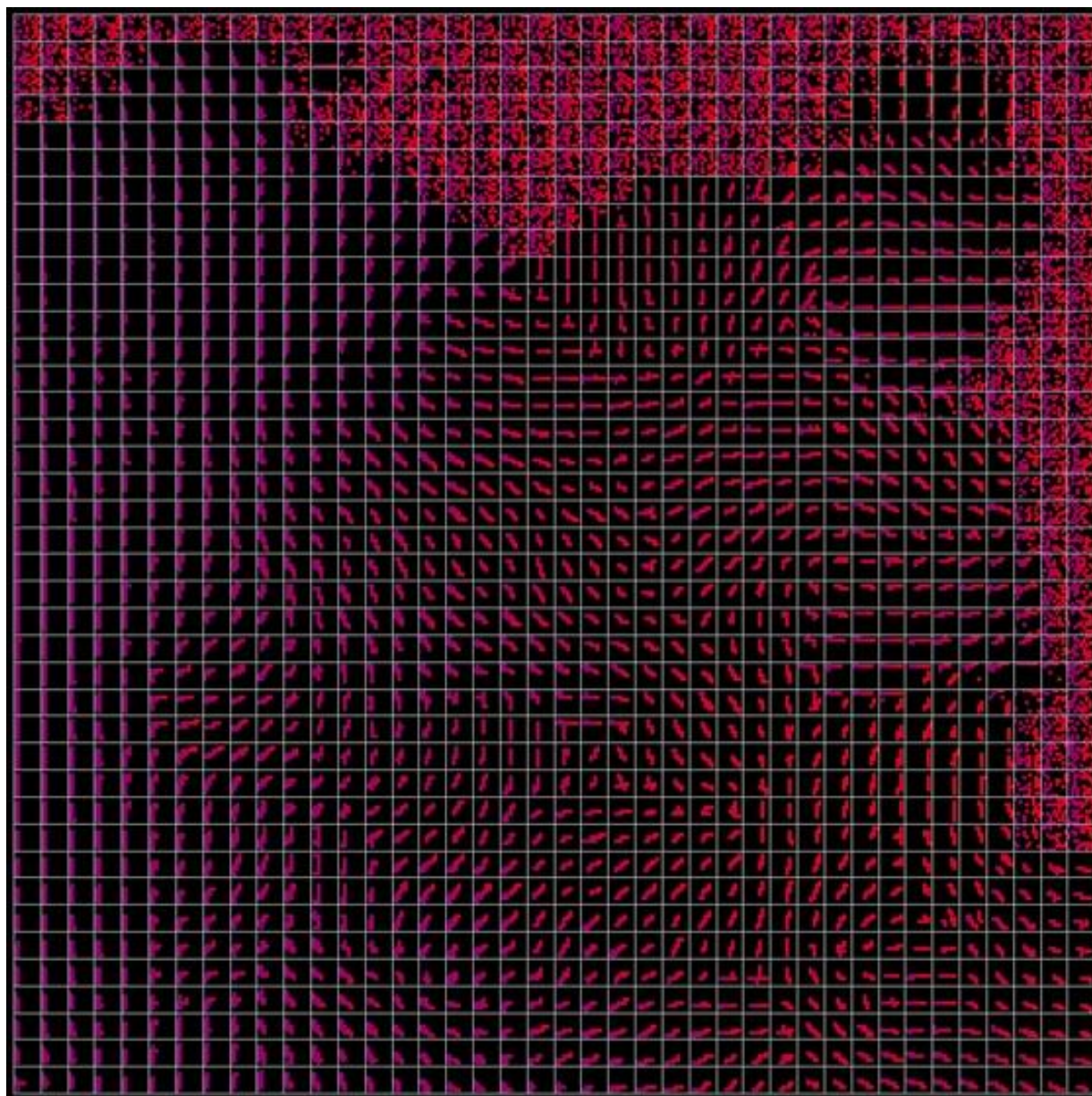


図 1 1 学習初期に視野周辺の刺激だけを与えた場合の学習結果.

図 1 1 では中心を担う細胞群と周辺を担う細胞群がそれぞれ集まっており, くだらかに中心から周辺へ切り替わっている様子が確認できる. このことからレチノトピーが再現できている.

以上よりモデルは上述した 1 次視覚野での特徴を再現することができた.

6. 今後の課題

図 1 1 において学習初期には視野の周辺領域の入力刺激しか与えない方法で学習したが, 生物学的にみて不自然であり, 端に位置する細胞同士に隣接関係を持たせる等の方法でレチノトピーを再現する方法を模索するべきである.

本モデルに与えた入力刺激は $n \times n = 12 \times 12$ の画像とした. 実際の視野を考えると, より大きな画像にすべきで

あったが, 計算機の都合上狭い視野になってしまったかもしれない. より大きな視野での入力刺激による学習を行うことにより, さらに 1 次視覚野に近いモデルを構築することができる可能性がある.

また本研究では単眼視野を想定したモデルを提案したが, 両眼視野を想定したモデルに発展させる必要があり, より自然な状況下で学習を行うべきである.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, ご指導を頂いた修士論文指導教員の平原誠准教授に心より感謝いたします.

参考文献

- [1] Obermayer K. Blasdel G. G. (1993): J. Neurosci., 13, 4114-4129.
- [2] Kohonen T. (1982): Biol. Cybern., 43, 59-69.