

両眼視における単純型細胞のコラム構造自己組織化

太田, 宏基 / OOTA, Hiroki

(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 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010353>

両眼視における単純型細胞のコラム構造の自己組織化

SELF-ORGANIZATION OF CORTICAL COLUMNS OF SIMPLE CELLS IN BINOCULAR VISION

太田宏基

Hiroki OOTA

指導教員 平原誠

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程

This study presents a self-organizing model of the primary visual cortex. The model consists of a layer of simple cells which receive binocular input. Computer experiments show that the neurons acquire monocular and binocular orientation selectivity and organizes orientation and ocular dominance columns.

Key Words : *Self-Organization, Columns, Simple cell, Binocular*

1. はじめに

物体の向き，位置，大きさなどによらない不変な認識が脳内でどのように実現されているのかについては不明な点が多い．本研究では，両眼視の状況下での単純型細胞の学習により，自己組織的にコラム構造を形成するモデルを提案し，計算機実験により動作確認することを目的とする．

2. 網膜から一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．

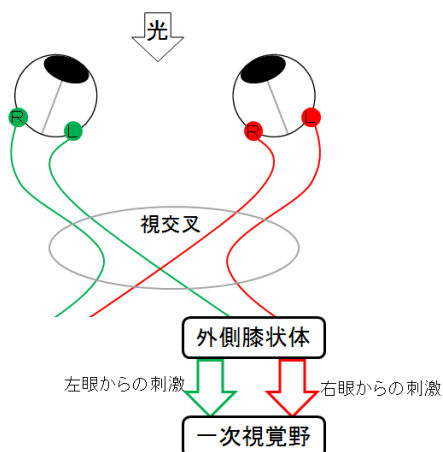


図1 網膜から一次視覚野までの経路

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，視交叉を經由し，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．この時，左網膜からの情報と右網膜の情報は完全に分離して分布する．

3. 単純型細胞

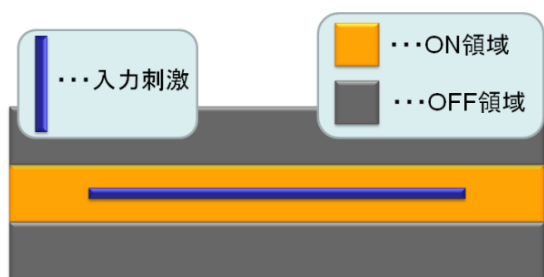
脳の一次視覚野（V1）には網膜上の特定の領域（受容野）に明暗の境界線がかかったとき，しかもその境界線の傾きが特定の方位を向いていたときにだけ反応する単純型細胞と呼ばれる細胞がある．

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領域に視覚刺激がかかるとき，反応が弱まる．一次視覚野には様々な方位に選択的に反応する単純型細胞がたくさん並んでおり，両眼性のものや単眼性のものがあると考えられている．

図2(a)，(b)に単純型細胞の受容野の一例を示す．図2におけるオレンジとグレーの領域はそれ

ぞれON領域とOFF領域を表し、また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。図2(b)では刺激A>B>Cの順に強く反応する。刺激AとBは入力の一部がON領域にかかり、一部がOFF領域にかかる。刺激Aが最適方位に対して若干傾いているのに対し、刺激Bは最適方位に対して直交している。刺激AとBを比較すると、刺激Aの方がON領域にかかる面積が大きくなり、OFF領域にかかる面積が少なくなっているのが確認できる。また、刺激Cは、最適方位に完全に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。

(a)



(b)

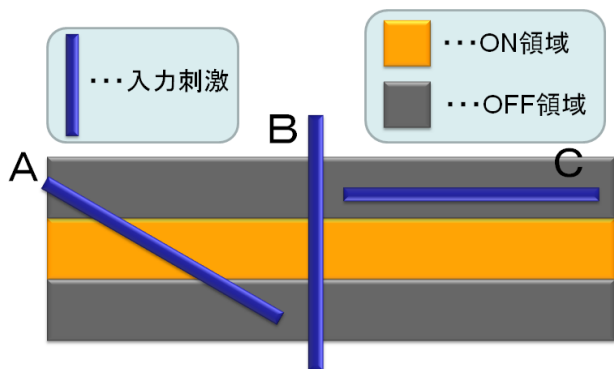


図2 単純型細胞の受容野の一例、

(a) 最適な入力刺激

(b) その他の入力刺激

4. コラム構造

V1における方位選択性を持つ神経細胞は無秩序に分布するのではなく、規則的に配列している。これを方位コラムと呼ぶ。

また、方位だけではなく、左右どちらかの眼に強く反応する眼優位性に関しても交互に並んでいると考えられており、こちらは眼優位コラムと呼ばれる[1]. 眼優位の切り替わりにおいても、方位が連続的に変化することが生理実験にて確認されている[2]. これらのコラム構造は脳皮質の表面から深

部に向けて柱状に構成されている。

図3にコラム構造のイメージを示す。左側面のLとRはそれぞれ左眼と右眼の眼優位を示しており、右側面の線分は、コラム内のそれぞれの細胞の最適方位を示している。

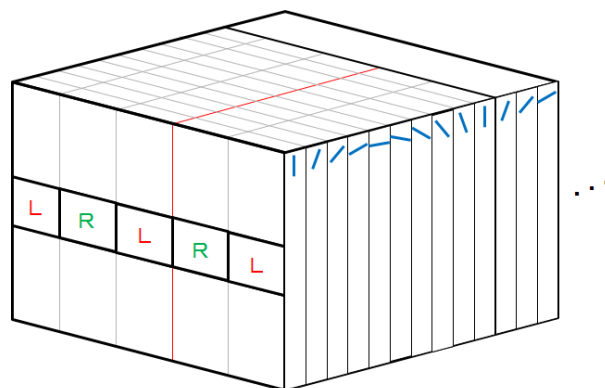


図3 コラム構造

このコラム構造の模式図については、その後発表された光記録を用いた実験結果によって、多少修正が必要となった。方位コラムは図3のモデルのように単純に平行に走っておらず、あらゆる傾きのコラムが風車のように一点に集中する部分や、連続して変化せずに直交するようなコラムが並んだ部分が確認されている。

また、左右の眼優位コラムの境目付近では、図3のモデルのように方位コラムが眼優位コラムに対して直交するような形で平行に並んでおり、方位が連続的に変化していることも確認されている[2].

図4に光記録の結果によって描かれた眼優位コラムと方位コラムのイメージを示す。太線で区切られている部分は眼優位コラムの境目を示し、Lは左眼、Rは右眼の眼優位を示す。また、細線で区切られている部分は方位コラムの境目を示し、傾き30度毎に変化する様子を示している。

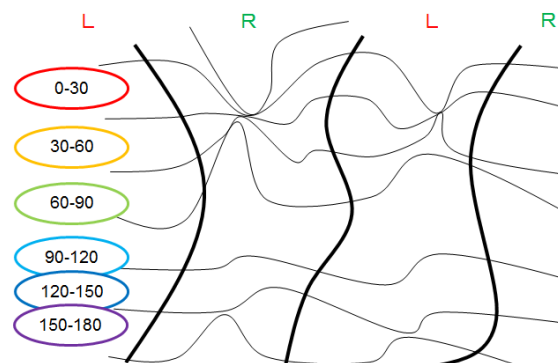


図4 光記録の結果によって描かれたコラム構造

5. 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ニューラルネットワークである自己組織化マップ（SOM）を用いる[3].

まず、3次元空間内に乱数で2点を選び、それを結ぶことで線分を作成した。線分を左眼視と右眼視用の $n \times n$ の画像に変換して入力刺激とする。図5に入力刺激作成のイメージを示す。

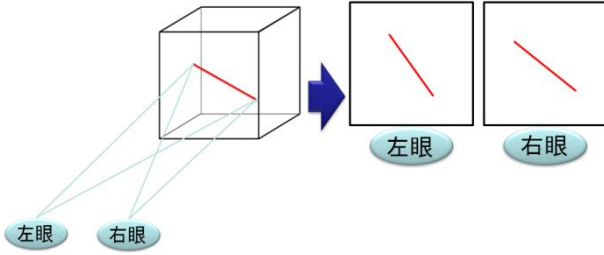


図5 両眼への入力刺激の作成

モデルは $m \times m$ 個の単純型細胞 $u_{ij}(i, j = 1, \dots, m)$ からなるV1層を持ち、各細胞は左眼入力刺激 $\{x_{kl}^{(L)}\}$ と右眼入力刺激 $\{x_{kl}^{(R)}\}$ に結びついている。それらの結びつきの強度をそれぞれ左眼参照ベクトル $\{w_{ijkl}^{(L)}\}$ と右眼参照ベクトル $\{w_{ijkl}^{(R)}\}$ と呼ぶ($k, l = 1, \dots, n$)。各単純型細胞の参照ベクトルは-1から1の間の乱数で初期化される。入力刺激とある1つの単純型細胞との結びつきを図6に示す。

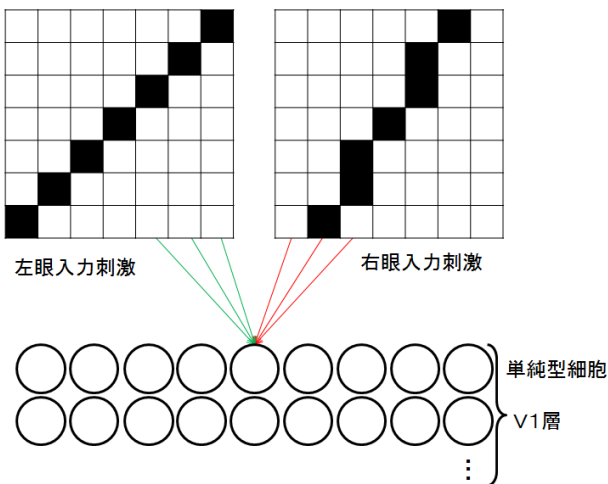


図6 入力データとある1つの単純型細胞の結びつき

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-1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。

Step2-1:

左眼と右眼それぞれについて、入力刺激と参照ベクトルとの距離を計算する。左と右の距離をそれぞれ $d_{ij}^{(L)}$ と $d_{ij}^{(R)}$ と表すと、

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

$$d_{ij}^{(R)} = \sum_{kl} \left(x_{kl}^{(R)}(t) - w_{ijkl}^{(R)}(t) \right)^2 \quad (2)$$

と書ける。

単純型細胞には学習が始まる前から眼優位をある程度与えており、これを眼優位係数 $\alpha_i^{(L)}$ 、 $\alpha_i^{(R)}$ ($0 < \alpha_i^{(L)} < 1$, $0 < \alpha_i^{(R)} < 1$, $i = 1, \dots, m$)と呼ぶ。図7に $\alpha_i^{(L)}$ 、 $\alpha_i^{(R)}$ の大小関係を示す。

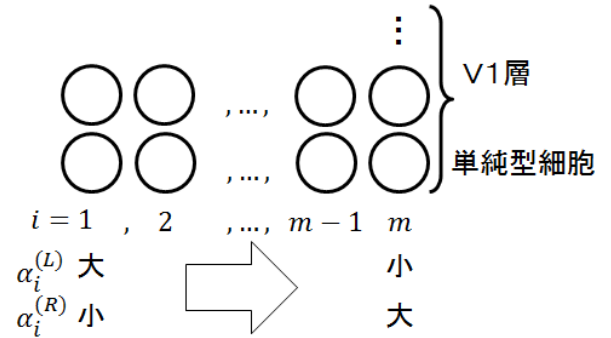


図7 $\alpha_i^{(L)}$ と $\alpha_i^{(R)}$ の値の大小関係

左眼優位となるV1層の左側では $\alpha_i^{(L)}$ を大きく、 $\alpha_i^{(R)}$ を小さく設定している。また、中央付近では $\alpha_i^{(L)}$ 、 $\alpha_i^{(R)}$ の値は等しく設定しており、両眼性を表現している。

これは図1に示したように外側膝状体からの出力が左眼、右眼で完全に分離して分布することを考慮している。

図8にそれぞれの眼から一次視覚野への結びつきを示す。今回の実験では格子状に並んだ単純型細胞のV1層の左側に左眼からの入力刺激が入り、右側には右眼からの入力刺激が入るモデルとした。また、左眼からの入力刺激と右眼からの入力刺激が重なりあう中央付近では、両眼からの情報を受けとるような構造になっている。

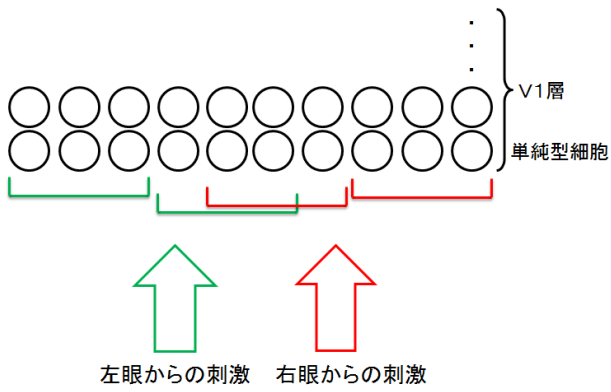


図8 それぞれの眼から一次視覚野への結びつき

Step2-2 :

眼優位係数を $d_{ij}^{(L)}$ と $d_{ij}^{(R)}$ にかけ、距離 d_{ij} を決定する.

$$d_{ij} = \alpha_i^{(L)} d_{ij}^{(L)} + \alpha_i^{(R)} d_{ij}^{(R)} \quad (3)$$

Step2-3 :

d_{ij} を最小とする単純型細胞 u_{IJ} を求め、勝者とする.

$$\{I, J\} = \arg \min_{ij} d_{ij} \quad (4)$$

Step2-4 :

参照ベクトルを次式により更新する.

$$w_{ijkl}^{(L)}(t+1) =$$

$$w_{ijkl}^{(L)}(t) + \varepsilon(t) h((i, j), (I, J), t) (x_{kl}^{(L)}(t) - w_{ijkl}^{(L)}(t)) \quad (5)$$

$$w_{ijkl}^{(R)}(t+1) =$$

$$w_{ijkl}^{(R)}(t) + \varepsilon(t) h((i, j), (I, J), t) (x_{kl}^{(R)}(t) - w_{ijkl}^{(R)}(t)) \quad (6)$$

$$h(t) = \exp\left\{-\frac{(i-I)^2 + (j-J)^2}{2\sigma^2(t)}\right\} \quad (7)$$

$\varepsilon(t)$ は学習係数で、1 よりも小さな値で設定する。
 h は近傍関数と呼ばれ、勝者である単純型細胞 u_{IJ} とその他の単純型細胞 u_{ij} との距離に関して単調減少する。また、 $\sigma^2(t)$ は時刻 t に応じて単調減少する。

6. 実験結果

図9 はある一つの単純型細胞のもつ参照ベクトルを示す。左眼参照ベクトル $w^{(L)}$ を赤で、右眼参照ベクトル $w^{(R)}$ を緑で表示しており、参照ベクトルの要素が1に近づくほど明るく、-1に近づくほど暗

くなっている。

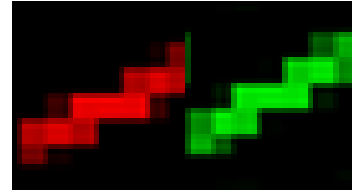
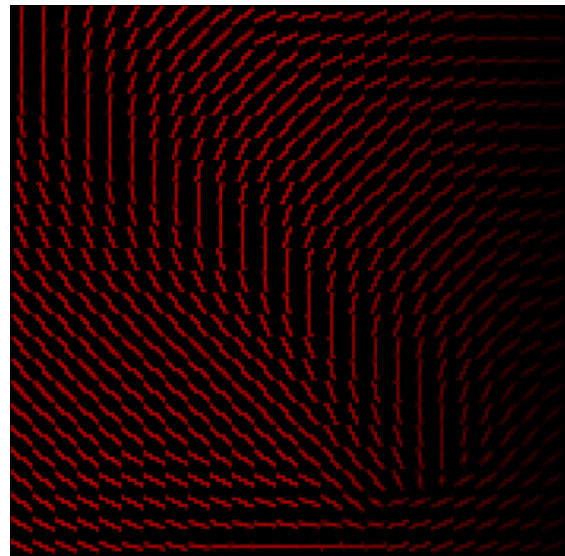


図9 ある一つの単純型細胞の参照ベクトル

図10 (a) と (b) はそれぞれ単純型細胞の左参照ベクトル $w^{(L)}$ と右参照ベクトル $w^{(R)}$ を格子状に並べたものである。横方向にも縦方向にも方位が連続的に変化しており、方位コラムが形成されている様子が確認できる。

(a)



(b)

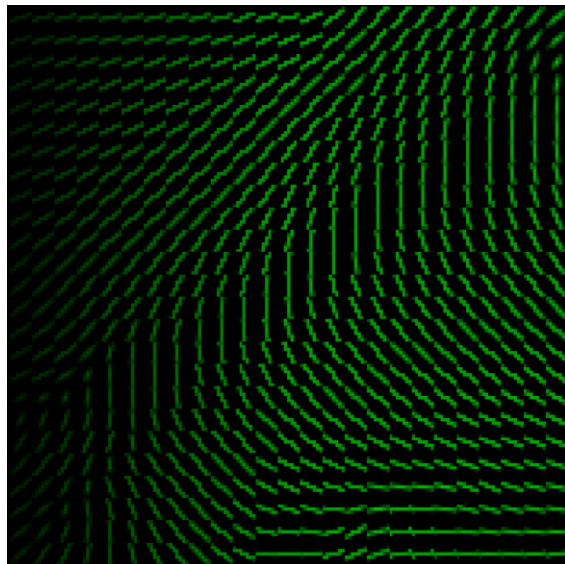
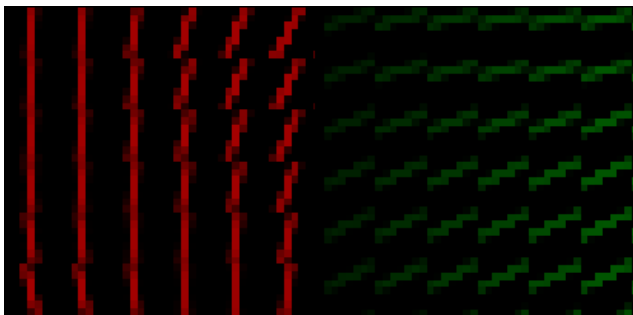


図10 V1層の単純型細胞の参照ベクトル、
 (a) 左眼に相当する部分
 (b) 右眼に相当する部分

図11(a)と(b)は図10の左上部分と中央部分を拡大して並べたものである。図11(a)では、左右で異なった方位に対する選択性を持っていることが確認できる。右眼に対応する部分では全体的に反応が弱く、左眼に対応する部分と比べると暗くなっており、方位の選択性もはっきりとしない。図11(b)では左右ともにほぼ同じ方位に対する選択性をもっており、明暗もほぼ同程度であることが確認できる。

(a)



(b)

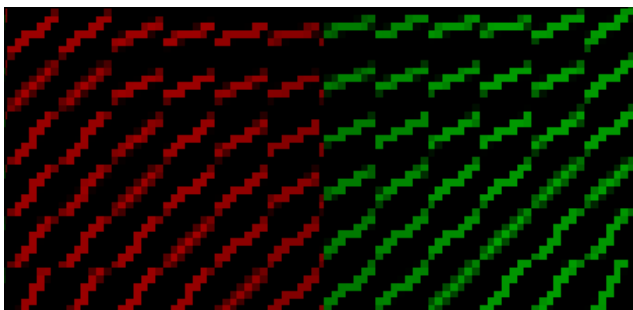


図11 図10を拡大したもの、

- (a) 左上部分を左右に並べたもの
- (b) 中央部分を左右に並べたもの

図12に様々な方位の線分を入力として与えたとき、左右で反応が強かったものを表示し、両眼合わせたものを示す。図12では方位が連続的に切り替わり、ほぼ全ての方位を確認することができる。

図13に図12の中心部分を拡大したものを示す。図13では眼優位が切り替わる部分でも、方位の連続性が失われておらず、左眼から右眼へなだらかに眼優位が切り替わっていることが確認できる。

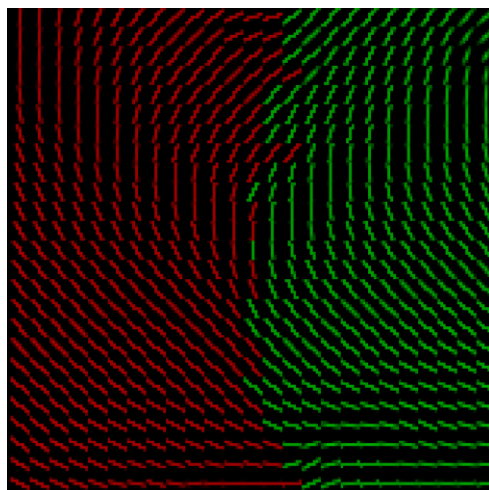


図12 両眼合わせたV1層

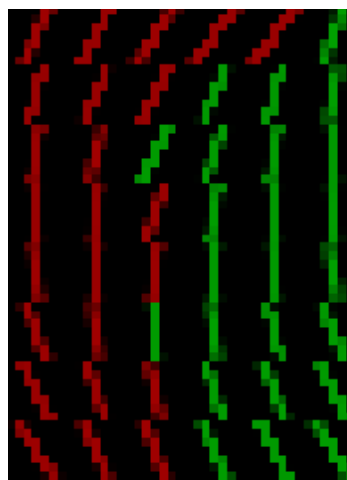


図13 眼優位が切り替わる部分

8. 考察

図10(a), (b)を確認すると方位が連続的に変化している様子が確認できた。これは生理実験から得られている方位コラムと一致する。

さらに、図11(a), (b), 図12, 図13を確認すると左眼から右眼に眼優位が切り替わる部分では、方位コラムが連続的に変化していることが確認できる。このことも生理学的知見と一致する。

コラム構造の項目で説明したように、実際の眼における眼優位コラムの境目から遠ざかった部分では、方位コラムの連続性が失われるような部分がある。しかし、今回のモデルでは、そういった部分は確認できなかった。これは左から右に一度切り替わるような狭い範囲でのコラム構造の形成に限定しているためである。複数のコラム構造が並ぶようなより大きな範囲でのモデルを考えることや、複数の勝者を選択するような場合を考えて、初めて確認できるようなものではないかと思う。

9. 今後の課題

今回の実験では視野の中心のみに着目し、そこを

見ているという前提の下、実験を行った。実際のコラム構造により近づけるには、受容野が重なり合うようなモデルについて考察する必要があると思われる。

また、外側膝状体からコラム構造への接続において、左眼、右眼のそれぞれからの入力完全に分離するという内容に基づき、あらかじめ眼優位を与え実験を行ったが、その数値の設定において、生物学的に見ると不自然な点があったかもしれない。

コラム構造に関しても、眼優位が切り替わる付近での実験結果は、実際のコラム構造に近い結果が得られたが、眼優位の中心部分で確認できる、方位コラムの連続性が失われるような部分についても今回の実験では確認できなかった。

参考文献

- [1] Hubel D. H., Wiesel T. N. (1962): "Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex", J. Physiol. (Lond), 160, 106-154.
- [2] Obermayer K., Blasdel G. G. (1993): "Geometry of orientation and ocular dominance columns in monkey striate cortex", J. Neurosci., 13, 4114-4129.
- [3] Kohonen T. (1982): "Self-Organized formation of topology correct feature maps", Biol. Cybern., 43, 59-69.