

TR - A - 0103

多重解像度による点パターンの構造化モデル

小山 隆正 乾 敏郎

1991. 3. 4

ATR 視聴覚機構研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町乾谷 ☎07749-5-1411

**ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories**

Inuidani, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1411

Facsimile: +81-7749-5-1408

Telex: 5452-516 ATR J

多重解像度による点パターンの構造化モデル

ATR視聴覚機構研究所 認知機構研究室

小山 隆正 乾 敏郎

— 目次 —

あらまし	1
1. まえがき	2
2. 視覚領ニューロンの受容野特性を持つフィルタの提案	3
2. 1 点パターンの補間生成神経モデルの概要	
2. 2 方位選択性を有するフィルタの形状	
2. 3 多重解像度 (multi-resolution) とパラメタ比の決定	
2. 4 パラメタの推定	
2. 4. 1 $\sigma_{env}$ の推定	
2. 4. 2 $\sigma_{ex}$ , $k$ の推定	
3 補間の原理とシミュレーション	7
3. 1 S, Lフィルタによる直線知覚・曲線知覚の原理	
3. 2 点の補間 (直線・曲線知覚) のシミュレーション実験	
4. 考察	9
4. 1 方位選択幅	
4. 2 空間周波数特性	
4. 3 受容野感度分布とその空間線形加算応答	
5. むすび	11
参考文献	12

## あらまし

我々は、近接する3点のなす角度が約 $140^\circ$ 前後より大きい場合、知覚される仮想線は曲線に、それ以外では直線になる傾向を有する。本稿ではこのような複数の点から構成されたパターンの補間機能を、視覚領の方位選択性に基づく神経回路モデルによって自動的に実現できることを示した。仮想線のアルゴリズムは以下の過程によって実現されていると仮定した。①各位置において各空間周波数チャンネル別に最大出力の方位選択性ニューロンの出力のみが選択される（局所的方位の決定）。②次に各々の選択された出力が加算され、ポテンシャル面が形成される（ポピュレーション・コーディング）。③ポテンシャルの尾根線が仮想線として知覚される。以上の仮定に従い3点と4点の場合のシミュレーションの結果を示した。結論として、補間現象に働くフィルタの最適周波数は $0.7\text{cycle/deg.}$ の低域通過フィルタで、方位選択幅が $\pm 20^\circ$ の特性をもつことが明らかにされた。

## 1. まえがき

人間のパターン認識の研究において、パターンの内部表現に関して与えられた図形をどの様に構造化しているかが問題になる<sup>(1)</sup>。構造化の方法として図形の特徴点を抽出する操作と、人間の能動的な働きである群化・補間という体制化アルゴリズムが重要である(図1)。乾ら(1989)は、曲率の高い部分、交点、端点等の特徴点とする図形の大局的な構造抽出を試み、同時に特徴点を並列に検出するアルゴリズムを提案した<sup>(1)(2)</sup>。しかし、特徴点の群化による構造化のアルゴリズムや特徴点間を補間することによる原図形の復元のアルゴリズムなどが十分考慮されていなかった。点パターンの補間の方法として、工学的にはスプライン(spline)関数が広く用いられている。スプライン関数による補間は、全ての点を通るように滑らかに結び、しかも曲率最小の性質(minimum curvature property)を有していることから、人間の視覚特性に適していると言われてきた。一方、Smits & Vos<sup>(3)</sup>は、3点のなす角度と点の間隔を変化させたときの補間の心理実験を行ない、直線知覚と曲線知覚の3点のなす角が、点の間隔が小さいときには約130°から145°の間、間隔が大きくなれば臨界値が約160°前後であることを示した。このことから、人間の視覚は点の配置によって必ずしもスプラインで補間せず、直線で補間する傾向を有することがわかる<sup>(4)</sup>。

一方、生理学的知見によれば、補間現象と密接に関連する主観的輪郭線も視覚領V2のニューロンが検出していることが明らかにされ<sup>(5)</sup>、その受容野の詳細な特性も調べられつつある<sup>(6)(7)</sup>。したがって、補間現象は、視覚領の比較的低次のレベルで生じている可能性が高い。更に視覚一次野には線分の方角に選択的に反応する細胞(単純型細胞 simple cell)の存在が確認され、空間周波数特性の異なるニューロンがコラム状に存在することが知られている<sup>(8)</sup>。そこで、本稿では、直線補間と曲線補間を自動的に選択し、実現するニューラルネットワークモデルを考案し、心理実験の結果にもとづき補間現象に関して2、3の考察を行なう。

## 2. 視覚領ニューロンの受容野特性を持つフィルタの提案

### 2.1 点パターンの補間生成神経モデルの概要

本稿では、直線や曲線補間が以下のようなニューラルネットワークによって実現されると考えた(図2)。まず、点パターンの情報は、複数の空間周波数チャンネルによって処理される(図2①)。この空間周波数チャンネルは、方位選択性を有する視覚領ニューロンの受容野のサイズと方位についての受容野特性に基づいている。ここで視覚領ニューロンの受容野応答は、各位置で各空間周波数チャンネルに対応するサイズの受容野ごとに計算される。次に、各位置で空間周波数チャンネル別に出力が最大のニューロンを選択する(図2①)。さらに、これらの選択されたニューロンの応答が空間加算され(ポピュレーション・コーディング)(図2②)、加算された出力を高次視覚領の細胞が検出する(図2③)ことによって仮想線が引き起こされていると考えた。ここで、細胞の検出は、各々のニューロンの応答の空間加算により形成されたポテンシャル面の尾根線を検出することで実現される。なお、仮想線はニューロンの弱い出力によって生じていると考えられるので、ポピュレーション・コーディングは、ニューロン間の相互作用は無視し、出力の単純な加算を行なうことで実現されるとした。

以下では、視覚領ニューロンの受容野特性に基づきフィルタの形状を推定し、そのパラメタを生理学的知見に基づき推定する。

### 2.2 方位選択性を有するフィルタの形状

視覚領ニューロンの単純型細胞の受容野の形状は、中心の興奮性領域が両側を抑制性領域で挟まれた形であり、興奮性領域の長軸の方向は最適方位に沿っている<sup>(9)</sup>。この受容野感度分布のモデルとして、最適方位を示す方向の受容野感度特性を一次元ガウス関数で近似的に表わされたモデルが知られている<sup>(9)</sup>。このモデルでは、ガウス関数の分散 $\sigma^2$ が受容野の長軸方向の長さや強さを規定している(図3)。本稿では、2次元の位置 $(x, y)$ での受容野感度分布のフィルタ $DOG(x, y)$ を

$$G(x, \sigma) = \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$DOG(x, y) = A G(y, \sigma_{env}) \left( G(x, \sigma_e) - k \frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{in}} G(x, \sigma_{in}) \right) \quad (2)$$

で与えた。ここで $\sigma_{env}$ は最適方位の方向に沿ったパラメタであり、 $G(y, \sigma_{env})$ は最適方位の感度分布を表す。 $\sigma_{ex}$ と $\sigma_{in}$ は各々最適方位に垂直の方向に沿った興奮領域と抑制領域の幅を示すパラメタで、 $G(x, \sigma_{ex})$ は興奮性の感度分布を、 $G(x, \sigma_{in})$ は抑制性の感度分布を表している。さらに、 $\sigma_{ex}$ と $\sigma_{in}$ の関係を $\sigma_{in} = 3\sigma_{ex}$ で与えた<sup>(10)</sup>。また、 $k$ は抑制の強さ、 $A$ は感度の強さを規定するパラメタとし、Linsenne

ierら(1982)の生理学的データから  $A = 1/(\sigma_{ex}^{1.23})$  とし<sup>(11)(12)</sup>、受容野の感度は興奮領域の幅に規定されるものとした。

方位選択性を持つ単純型細胞の発火頻度は、方位  $\theta$  と位置  $(x, y)$  の関数で与えられる。  $O(x, y, \theta)$  を方位  $\theta$  での発火頻度とすると、  $O(x, y, \theta)$  は、方位  $\theta$  での単純型細胞の受容野感度分布を与えるフィルタ  $F(x, y, \theta)$  と入力図形  $I(x, y)$  の畳み込みに半波整流関数  $\phi[x]$

$$\phi[x] \begin{cases} = x & (x > 0) \\ = 0 & (x \leq 0) \end{cases}$$

を通したものであり、閾値  $\phi_0$  を用いて次式(3)で与えることができる。

$$O(x, y, \theta) = \phi \left[ \int \int_{(u, v) \in R^2} F(x-u, y-v, \theta) I(u, v) \, dudv - \phi_0 \right] \quad (3)$$

$$F(x, y, \theta) = \text{DOG}(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \sin \theta)$$

大脳の視覚領の方位コラムの最適方位は約  $10^\circ$  おきに変化している<sup>(8)</sup>。さらに次段階で応答は、各位置で空間周波数チャンネル別にその出力が最大になるニューロンが選択されると仮定した。これはWTA (Winner Take All) 回路<sup>(13)(14)</sup>によって実現できる。したがって、各位置  $(x, y)$  での視覚領ニューロンの受容野の応答  $O(x, y)$  は、次式(4)で与えられる。

$$O(x, y) = \max_{\theta} O(x, y, \theta) \quad (4)$$

また、本稿では単純型細胞が2点により与えられる方位に応答すると考え、閾値  $\phi_0$  を2点間の方位を決定する最小の出力であるとした。したがって、

$$\phi_0 = \max_{\theta} \int \int_{I(u, v) \notin \text{Supp}(F)} F(x-u, y-v, \theta) I(u, v) \, dudv \quad (5)$$

で与えた。ここで、 $\text{Supp}(F)$  はフィルタ  $F(x, y, \theta)$  の台で、かつ最小2つの点刺激を含むようにフィルタが動く領域を表すものとする(図4)。

### 2.3 多重解像度 (multi-resolution) とパラメタ比の決定

視覚領では空間周波数特性の異なるニューロンがコラム状に存在する<sup>(8)</sup>ことが知られている。本稿では、視覚の空間周波数のチャンネルは、大きさ・長さの情報を処理するDOGフィルタ((2)式)のサイズ、即ち、パラメタ  $\sigma_{env}$ ,  $\sigma_{ex}$ ,  $\sigma_{in}$  によって規定されるものとした。このパラメタを持つフィルタは、自己相似形であり、各フィルタのパラメタの値によって処理する情報の細かさ・粗さは異なる。また、このようなマルチ・チャンネルが視覚系に存在することが実験的にも確かめられている<sup>(15)</sup>

(16)。

一方、Stevens(1976)はGlass patternに関する体制化の知覚実験から、パターン  
の構造化に関して局所的方法の重要性を示唆した<sup>(17)</sup>。この知見は、近接した点に  
対する処理が重要であることを指摘していると考えられる。したがって、以下では  
隣接する3点のなす角度と、方位選択性をもつ大小2種類のサイズの異なるフィル  
タに注目し、これらのフィルタの出力が異なるために、条件に応じて異なる補間現  
象が引き起こされると考えた。以後、大小2種類のフィルタを、各々Lフィルタと  
Sフィルタと呼ぶことにする。

Smits & Vos(1987)らは、等間隔に配置された隣接する3点での曲線・直線知覚の  
弁別境界閾(50%閾)は3点のなす角が約135から145°の間と報告<sup>(3)</sup>している。本稿  
では、この弁別境界閾を与える点の配置から、L、S2種類のフィルタの最適方位  
のサイズ比(=S、Lフィルタの $\sigma_{env}$ 比)が推定されると仮定した。すなわち、弁  
別境界閾を与える3点の配置では、最長を与える2点間の距離に対してLフィルタ  
が、最短を与える2点間の距離に対してSフィルタが応答を与えていると考えた。以  
上のことから、弁別境界閾を約140°として、S、Lフィルタのパラメタ比は近似的  
に

$$\begin{aligned} &L \text{ フィルタの } \sigma_{env} : S \text{ フィルタの } \sigma_{env} \approx \\ &\text{最長を与える2点間の距離} : \text{最短を与える2点間の距離、} \end{aligned}$$

から求めることができると仮定した。この仮説の下では2つのフィルタのパラメタ  
比は2:1となる。即ち、2つのフィルタ自己相似性から、L、Sフィルタの全て  
のパラメタ比は2:1になり、オクターブ・フィルタ<sup>(15)(18)</sup>になっていることが  
わかる(図5)。以後、本稿ではS、Lフィルタはオクターブ・フィルタを用いる  
ことにする。

## 2.4 パラメタの推定

(2)式のフィルタのパラメタ $\sigma_{env}$ 、 $\sigma_{ex}$ (= $\sigma_{in}/3$ )、 $k$ は以下の①②の方法で  
推定できる。

### 2.4.1 $\sigma_{env}$ の推定

最適方位((2)式のy方向)と側抑制方向((2)式のx方向)は一定のアスペ  
クト比を保つ相似形であることから、パラメタ $\sigma_{env}$ の推定は最適方位でのSフィル  
タの応答に注目する。最適方位でのSフィルタの応答は、予め固定された2点間の  
距離に対し、(2)式より $\sigma_{env}$ により変動する。本稿では、2点間の中心でSフィ  
ルタが最大の応答を得るように $\sigma_{env}$ を推定した。したがって、 $\sigma_{env}$ は次式(6)  
で得られる $\sigma$ で与えられる。



$$\frac{d}{d\sigma} \left[ \int I(v) \frac{1}{\sigma^{1.23}} G(v-y, \sigma) dv \right]_{y=0} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $I(v)$ は最適方位での入力パターンを表し、

$$I(v) \begin{cases} = 1 (v=\pm \rho/2: \rho \text{ は 2 点の間隔}) \\ = 0 (\text{それ以外}) \end{cases}$$

である。なお、(6)式より、 $\sigma_{env}$ は点の間隔 $\rho$ の関数であり、後のシミュレーションを考慮して $\rho=120$ で固定した。以上の結果、 $\sigma_{env}=77$ を得た。

#### 2.4.2 $\sigma_{ex}$ , $k$ の推定

$\sigma_{ex}$ ,  $k$ は、フィルタのアスペクト比により決定される。ここでアスペクト比は、 $x_0$ を(2)式のDOG( $x, y$ )の原点からゼロ交差点までの幅として、 $x_0: \sigma_{env}$ で与えられる。(2)式から $x_0$ は

$$x_0 = \sqrt{\left[ \ln\left(\frac{\sigma_{in}}{k\sigma_{ex}}\right) \middle/ \left(\frac{1}{\sigma_{in}^2} - \frac{1}{\sigma_{ex}^2}\right) \right]} \quad (7)$$

となる。Dowらによれば最適刺激の幅と受容野の長さの比は平均3.4である<sup>(19)</sup>。このことから、本稿では、 $2x_0:2\sigma_{env}=2:6$ 、即ちアスペクト比を1:3とした。その結果、 $\sigma_{ex}=56, k=2.5$ を得た。以下、これらの値をフィルタのパラメタとして固定する。

### 3 補間の原理とシミュレーション

#### 3.1 S, Lフィルタによる直線知覚・曲線知覚の原理

補間の原理を、大きさが相似であるL, Sフィルタ(2.3参照)を用いて説明する(図6)。S, Lフィルタの応答は、フィルタの側抑制の領域に点が属する配置関係に点があるかどうかによって大きく異なる。図6(a)のように点が配置された場合、2つのSフィルタはそれぞれ、点p1と点p2、点p1と点p3を含むため発火する。同時に、Lフィルタも点p1, 点p2, 点p3がLフィルタの興奮性領域に入るために発火する。したがって、ニューロンの応答を空間加算(ポピュレーション・コーディング)する際には、S, L両フィルタの応答が加算される。

一方、図6(b)のように点が配置された場合、2つのSフィルタは図6(a)と同様の理由により発火するが、Lフィルタは点p2, 点p3は検出するが、点p1がフィルタの抑制性の領域に入るために発火しない。したがって図6(b)でのポピュレーション・コーディングは、Lフィルタの畳み込みの応答が0になり、2つのSフィルタの畳み込みの応答により得られることになる。したがって、曲線・直線の自動的な選択はLフィルタの応答に規定されている。

図7は、図6の点p1を変化させたときのLフィルタの応答の分布の変化を示した図であり、Lフィルタの特性を顕著に表している。点p1が点p2, p3から離れる(図(a)から(c))にしたがって、Lフィルタの応答の分布は、点p1の移動方向に引きずられ、やがて2つに分離する(図7(c))。

直線・曲線知覚の境界は、Lフィルタの応答分布が分離する境界、もしくは点p1の位置での出力が得られる境界を求めることで得られる。シミュレーションの結果から求めたところ3点のなす角が約 $132^{\circ}$ - $135^{\circ}$ となり、Smitsらの実験結果<sup>(3)</sup>と近い値を得た。また、図7で、点p2p3間の全ての位置でLフィルタの出力が0になる点の配置を求めたところ、 $\angle p2p1p3$ は約 $72^{\circ}$ となった。このことは $\angle p2p1p3$ が $72^{\circ}$ 前後より小さい角度ではLフィルタからは全く応答が得られないこと、即ち直線知覚しか生じないことが分かる。なお、ここでシミュレーションに際して、Sフィルタのパラメタは2.3で推定した値を用いた。

#### 3.2 点の補間(直線・曲線知覚)のシミュレーション実験

本稿で提案したアルゴリズム(図2)に基づいて、モデルのシミュレーションを3点と4点の場合で行った。図8, 9は本稿で提案したモデルによるシミュレーション結果である。入力パターンは、曲線知覚、曲線・直線知覚の臨界、直線知覚の例として内角の角度(a)  $146.6^{\circ}$  ( $h=18$ :  $h$ は図6に示した $h$ )、(b)  $135^{\circ}$  ( $h=23$ )、(c)  $122.7^{\circ}$  ( $h=40$ )の場合を選択した。フィルタのパラメタは2.3で求めたものを用いた。また、尾根線検出処理は2つのマスク処理、①凸部検出処理U1: 各点で、4方向( $0, 45, 90, 135^{\circ}$ )を持つ $1 \times 3$ マスクで凸部検出処理、②最大値検出

処理U2：各4方向（0, 45, 90, 135°）での全ての最大値検出との組合せで行なった。  
図8は処理U1によるシミュレーション結果であり、左列はポピュレーション・コーディングにより生成されたポテンシャル面の階調画像を、右列は処理U1の結果を示している。また図9は図8において処理U2を加えた結果を示している。シミュレーションの結果、角度が大きい場合（a）と曲線に結ばれ、小さい場合は折れ線（c）で仮想線が結ばれることが分かる。図10には、図8, 9に対応する点パターンを3次スプライン関数で補間した結果を示した。図8, 9, 10の結果から、角度が大きい場合には3次スプライン関数の補間に近いことがわかる。

#### 4. 考察

本稿で推定した補間生成に作用するフィルタの整合性について生理学的知見との比較を踏まえて考察する。ここでは、1) 方位選択幅、2) 空間周波数、3) 受容野感度分布とその空間線形加算応答について述べる。

##### 4. 1 方位選択幅

フィルタの中心を通る軸を入力としたとき、フィルタの応答は軸の方位に依存して異なる。各方位での応答の軌跡は、最適方位で最大値を取り、最適方位から離れるにしたがって減衰する曲線であり、方位選択曲線と呼ばれる。フィルタの方位選択曲線 $T(\theta)$ は、入力図形を $I$ として、次式(8)で与えられる。

$$T(\theta) = \phi \left[ \iint_{I(u,v) \in \text{Supp}(F)} F(u,v,\theta) I(u,v) \, dudv \right] \quad (8)$$

図11は、各方位と軸幅の変化した際の方位選択曲線を、(8)式から計算した結果である。ここで、方位コラムの最適幅が $10^\circ$ <sup>(8)</sup>であることから、各方向(図11のORIENTATION: 軸 $y$ )を $10^\circ$ 刻みとし、軸幅(WIDTH: 軸 $x$ )を1から40画素、軸長 $L=120$ 画素で固定した。

Schillerらによれば、方位選択幅 $w$  (tuning width) は、出力 $R$ が

$$R = \frac{\text{最大出力値}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

を与える角度 $w$ で与えられる<sup>(20)(21)</sup>。図11の $x$  $y$ 平面に方位選択幅を両矢印で示した。その結果、方位選択幅は、軸幅20画素以内では両側 $\pm 20^\circ$ で一定であることがわかる。Schillerらは、単純型細胞の方位選択幅と網膜偏心度が両側 $\pm 20^\circ$ を基準として相関 $r=-0.15$ でほぼ一定であることを示している<sup>(20)</sup>。したがって、本稿で求めた方位選択幅は生理学的にも合致している。

##### 4. 2 空間周波数特性

Nguyen(1987)は、初期視覚のフィルタの持つ最小のチャンネルの大きさをFourier変換を用いて求めた<sup>(22)</sup>。この方法に従い、シミュレーションに用いた $L$ フィルタの最適周波数 $\omega$  (rad/pixels) を求めると

$$\omega = \sqrt{\left[ \ln\left( \frac{k \sigma_{in}^2}{\sigma_{ex}^2} \right) \right] / \left( \frac{4}{\sigma_{in}^2} - \frac{4}{\sigma_{ex}^2} \right)} \quad (10)$$

を得、 $\sigma_{in} = 3\sigma_{ex}$ であることから、 $\omega = 1.248/112(\text{rad/pixels})$ を得る。ここで、生理知見との比較をするため、最適周波数 $\omega$ を、Smits & Vos(1987)の実験パターンの配置<sup>(3)</sup>に即して視角との対応からrad/degに換算し、さらに $f(\text{cycle/deg})$ に換算した。その結果、最適周波数 $f$ は $f = 0.355(\text{cycle/deg})$ となった。したがって、Sフィルタの最適周波数( $=2f$ )はおよそ $0.7(\text{cycle/deg})$ と推定される。一方、De Valois(1982)らによると、中心窩付近で受容野を持つ細胞は $0.5-15\text{cycle/deg}$ であること、帯域幅が $1.2-2.3$ , 中央値 $1.5$ オクターブである<sup>(16)(23)</sup>ことから、推定したS, Lフィルタが生理学的にもかなりの低域周波数フィルタであると考えられる。

#### 4. 3 受容野感度分布とその空間線形加算応答

本稿では、点の間隔の変化に対応する受容野の発火パターンを、方位選択性の最適方向をガウス分布の出力で近似的に与え、視覚領ニューロンの特性を表すフィルタとした。しかし、点の間隔を検出するフィルタが、単純型細胞の発火パターンに依存すると仮定するのであれば、線分の長さの変化による応答を求めることは重要になる。KatoらやOrbanらは、最適方向に沿った線の長さを変化させたときの単純型細胞の発火頻度を求めている<sup>(24)(25)</sup>。彼らの実験結果から、受容野の発火パターンを求める際に、線刺激が最適方位に対して線形に増加させていることから、発火頻度は長さに対する線形空間加重応答と考えられる。したがって、受容野の感度分布は発火頻度の微分(差分)を求めることで得られる。

図12は、単純型細胞の発火頻度の近似曲線と、その微分により推定された受容野感度分布を示す。図12の右側に示されたデータ(白四角)はOrbanらのデータである。横軸は刺激に用いられた棒の長さ(単位は1目盛=1°)で縦軸は発火頻度(1目盛=1 spikes/response)を示す。発火頻度は、線分長が増加するに伴って単調に増加し、受容野の大きさを越える線分長になると、一定の発火頻度になる。このことから、発火頻度 $P(L)$ ( $L$ :線分長)を3次関数( $L \leq \theta$ )と直線( $L \geq \theta$ )で近似できると仮定して、最小2乗近似により求めた。この方法により受容野の発火パターンの形状を推定したところ3種類のパターンに分類することができた(図13)。本稿で用いた受容野の感度分布はType Aに近いものであった。しかし、2点の方向性を表現する場合、Type BやType Cの受容野の方が合理的である(2点の間隔が小さい場合や大きい場合は出力は小さく、2点が適当な間隔の時に出力が最大になる)。今後このような受容野をもつ神経回路により補間現象のシミュレーションを行う必要がある。

## 5. むすび

人間の直線による補間や曲線による補間現象に注目し、点パターンの仮想線生成モデルを提案し、計算機シミュレーションによりこの現象を実現した。更に、心理・生理学的知見に基づきフィルタの視覚特性の検討を行ない、モデルの整合性を示した。本稿では、3点および4点に対して仮想線の形状の推定を行ったが、この推定は、知覚において顕著な主観的輪郭線などの現象に比べて、「点の見えかた」という不確定な要因があるために一層問題を難しくしている。先に、乾らは点の結びの見えかたが多角形から曲線に見えるための最小の点の個数は7-8個であることをモデルと心理実験から検証した<sup>(1)(2)</sup>。そこで、本研究で提案されたモデルを円周上に等間隔に配置して点の個数を増やしたときのモデルの出力を調べ、これらの心理学的知見との比較検討を行なう必要もある。

一方、本稿で提案したモデルは、各点に対して単純型細胞の受容野感度分布をフィルタとした順方向の神経回路網モデルであった。しかし、高次視覚領でも視覚情報が段階的に処理し伝送されているとすれば、方位選択性を持つ視覚領ニューロンの最適方位の決定方法、フィルタ応答のポピュレーション・コーディングの仕方、及び最終的な尾根線検出方法に対応する生理学的知見を考慮に入れることが必要である。そこで、今後、この処理過程を考慮したモデルを構築し、シミュレーションを行う必要がある。

## 謝辞

本研究の機会を与えて下さった(株)ATR視聴覚機構研究所淀川英司社長、及び同研究所認知機構研究室中根一成室長に感謝致します。また、多くの助言を頂いた当研究所研究員諸氏に感謝致します。特に岡本俊明氏、及び村上由彦氏には計算機シミュレーションに関して助言を頂き、感謝致します。

## 参考文献

- (1) 乾敏郎, 三宅誠 (1989): 図形の構造記述と視覚記憶のモデル(1). 信学技報 MEとバイオサイバネティクス研究会MBE pp.89-107.
- (2) Inui, T. (1989): A model of human visual memory : Data compression with Multi-resolution. Proc. The 6th Scandinavian Conference on Image Analysis, June 19-22, pp.325-332.
- (3) Smits, J. and Vos, P. (1987): The perception of continuous curves in dot stimuli. Perception, 16, pp.121-131.
- (4) 乾敏郎 (1988): 原始スケッチを生成する神経回路, 第10回神経科学情報研究会, Aug. 1988.
- (5) von der Heydt, R., and Peterhans, E., and Baumgartner, G. (1984) : Illusory contours and cortical neuron responses. Science, Vol. 224, pp. 1260-1262.
- (6) von der Heydt, R., and Peterhans, E. (1989): Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. I. Lines of pattern discontinuity. J. Neuroscience, Vol. 9, No.5, May, pp.1731-1748.
- (7) Peterhans, E., and von der Heydt, R. (1989): Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. II. Contour bridging gaps. J. Neuroscience, Vol. 9, No.5, May, pp.1749-1763.
- (8) Hubel, D., and Wiesel, T. (1977) : Ferrier Lecture, Functional architecture of macaque monkey visual cortex. Proc. R. Soc. Lond. B., 198, pp.1-59.
- (9) Wilson, H., and Gelb, D. (1984): Modified line-element theory for spatial-frequency and width discrimination. J. Opt. Soc. America, A1, pp.124-131.
- (10) Wilson, H. (1978): Quantitative characterization of two types of line-spread function near the fovea. Vision Research, Vol. 18, pp. 971-981.
- (11) Linsenmeier, R., Frishman, L., Jakiela, H., and Enroth-Cugell, C. (1982): Receptive field properties of X and Y cells in the cat retina derived from contrast sensitivity measurement. Vision Research, Vol.22, pp. 1173-1183.
- (12) 乾敏郎, 可児一孝, 三宅誠 (1989) : ヒトの網膜Y細胞受容野密度の推定. 神経眼科学会誌 第6巻4号

- (13) Yuille, A., and Grzywacz, N. (1989): A Winner-Tak-All mechanism based on presynaptic inhibition feedback.  
Nerual Computation, Vol.1, pp. 334-347.
- (14) Koch, C., and Ullman, S. (1985): Selecting one among many: A simple network implementing shifts in selective visual attention.  
Human Neurobiology, Vol.4, pp. 219-227.
- (15) Wilson, H., McFarlane, D., and Phillips, G. (1983): Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking .  
Vision Research, Vol. 23, pp. 873-882.
- (16) De Valois, R., Albrecht, D., and Thorell, L. (1982): Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex.  
Vision Research, Vol. 22, pp. 545-559.
- (17) Stevens, K. (1978): Computation of locally parallel structure.  
Biological Cybernetics, Vol. 29, pp.19-26.
- (18) Watson, A. (1982) : Summation of grating patches indicates many types of detector at one retinal location.  
Vision Research, Vol. 22, pp. 17-25.
- (19) Dow, B., Snyder, A., Vautin, R., and Bauer, R. (1981): Magnification factor and receptive field size in foveal striate cortex of the monkey. Experimental Brain Research, Vol. 44, pp. 213-228.
- (20) Schiller, P., Finley, B., and Volman, S. (1976): Quantitative studies of single-cell properties in monkey striate cortex. II. Orientation specificity and ocular dominance.  
Vision Research, Vol. 39, No. 6, pp. 1320-1333.
- (21) Schiller, P., Finley, B., and Volman, S. (1976): Quantitative studies of single-cell properties in monkey striate cortex. III. Spacial Frequency. Vision Research, Vol. 39, No. 6, pp. 1334-1351.
- (22) Nguyen, D. (1987): Prediction of the smallest channel in early human vision. IEEE Trans. SMC, Vol. 17, No.1, pp. 106-108.
- (23) De Valois, R., Yund, E., and Hepler, N. (1982): The orientation and direction selectivity of cells in macaque visual cortex.  
Vision Research, Vol. 22, pp. 531-544.
- (24) Kato, H., Bishop, P. O. and Orban, G. A. (1978): Hypercomplex and simple/complex cell classifications in cat striate cortex.  
J. Neurophysiology, Vol. 41, No.5, pp.1071-1095.
- (25) Orban, G. A., Kato, H. and Bishop, P. O. (1979) : End-Zone refion in receptive fields of Hypercomplex and other striate neurons in the cat. J. Neurophysiology, Vol.42, No.3, pp.818-823.



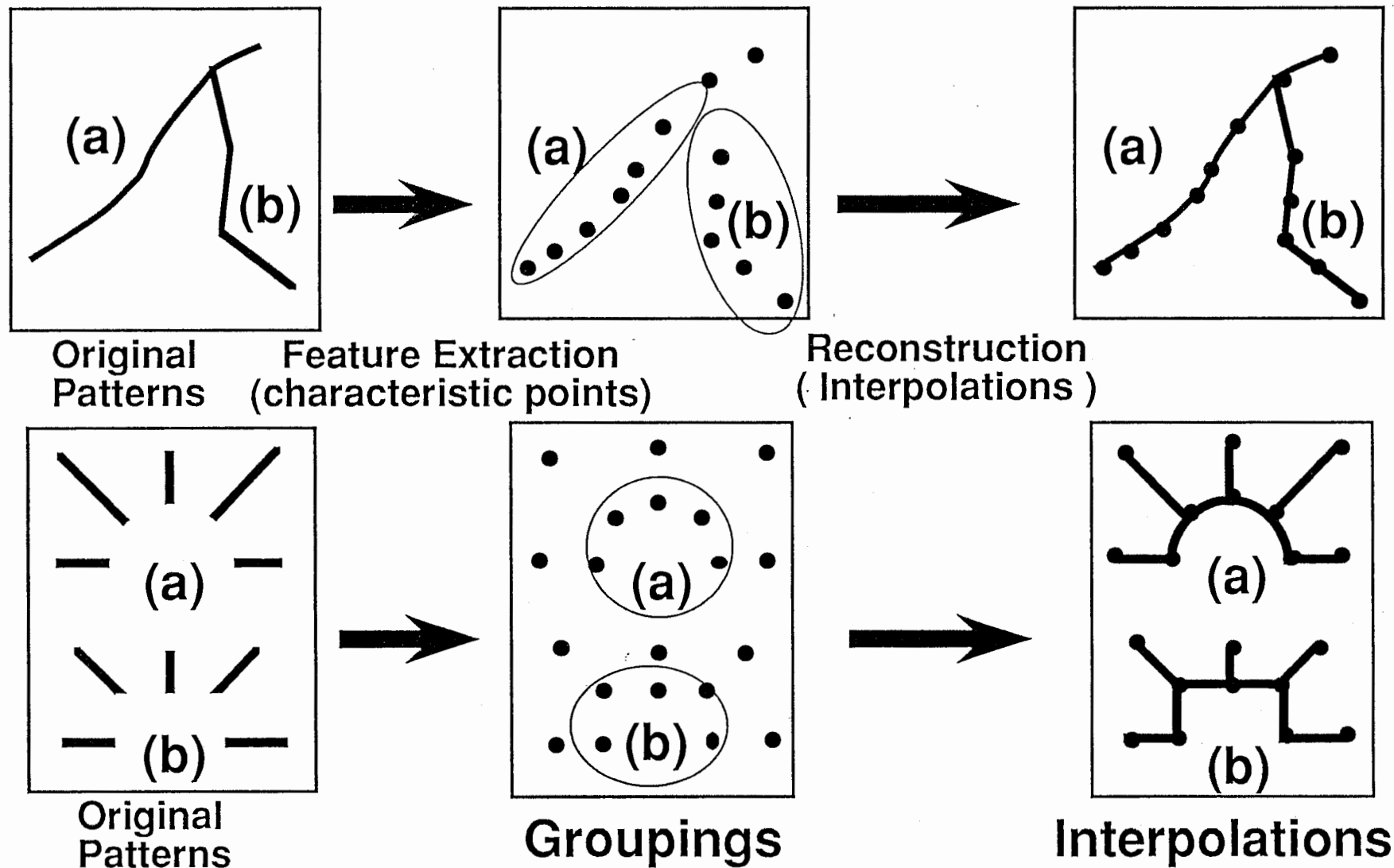


図1 点パターンの体制化 (群化・補完と曲線補間(a)/曲線補間(b))

Fig. 1 Figural organization for dot patterns by curves(a)/lines(b) interpolation

① 各位置において各空間周波数チャンネル別に最大出力の方位選択性ニューロンの出力のみが選択される  
(局所的方位の決定)

Spatial summation of the S-filter for the nearest two points and the L-filter among the three points



② 次に各々の選択された出力が加算され、  
ポテンシャル面が形成される  
(ポピュレーションコーディング)

A potential surface by the spatial summation of each response ( Population Coding)

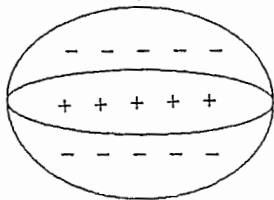


③ ポテンシャル面の尾根線が仮想線として  
知覚される

A ridge of the surface is a perceived curve

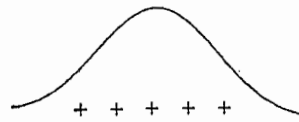
図2 補間のアルゴリズム

Fig.2 An algorithm of virtual curve/lines generation



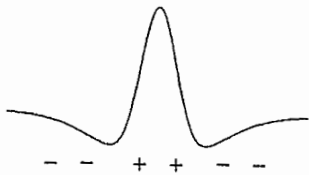
方位選択性の受容野の形

### Shape of RF



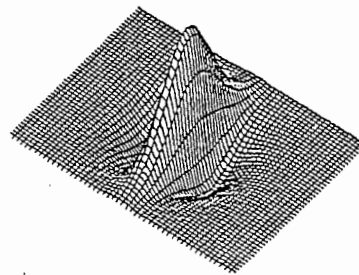
y-軸方向: Gaussian Function

### Gaussian function in the preferred orientation



x-軸方向: DOG Function

### DOG function perpendicular to the orientation



### Profile of RF of Simple Cell

図3 単純型細胞の受容野感度分布

Fig. 3 A profile of the receptive field (RF) of a simple cell

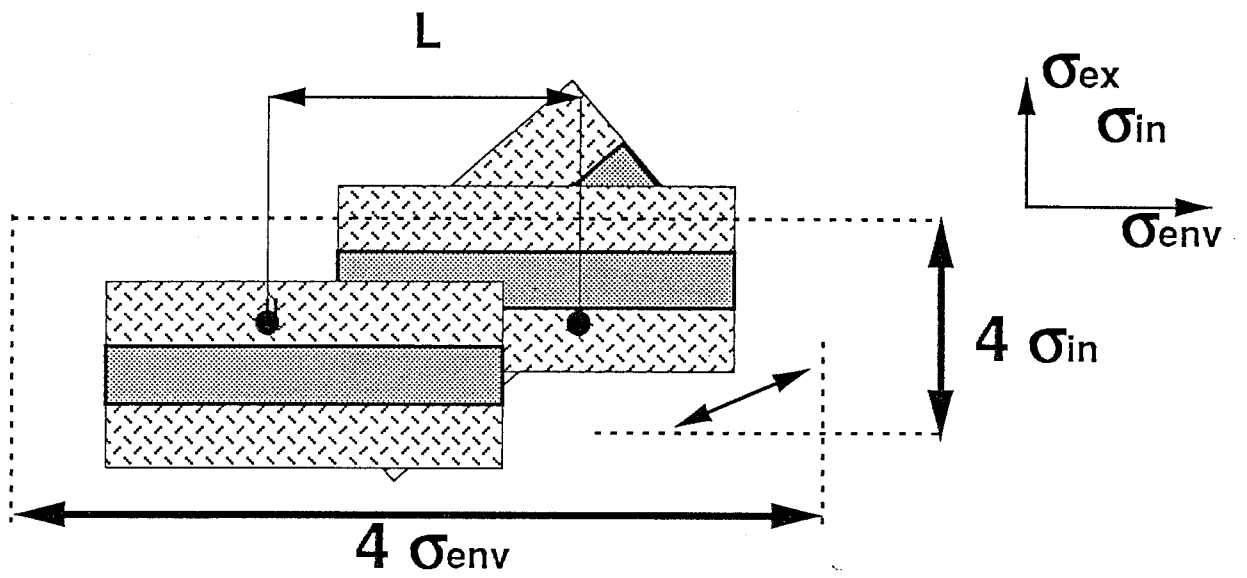


図 4 Supp(F) の領域

Fig. 4 Spatial summation and its domain ( Supp(F) )

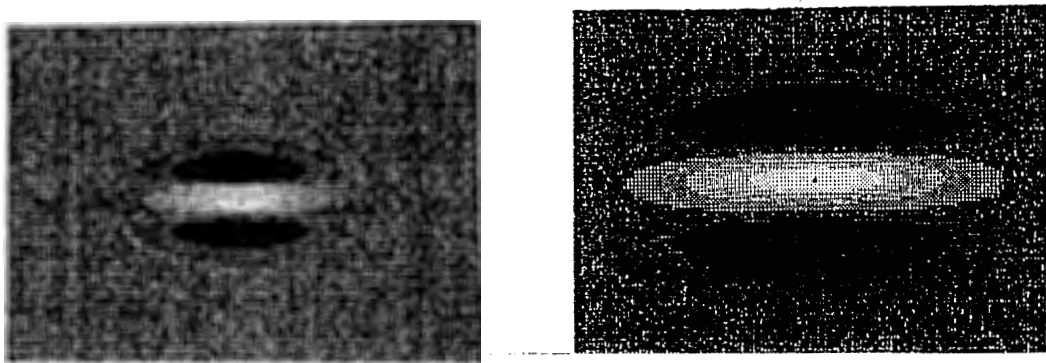
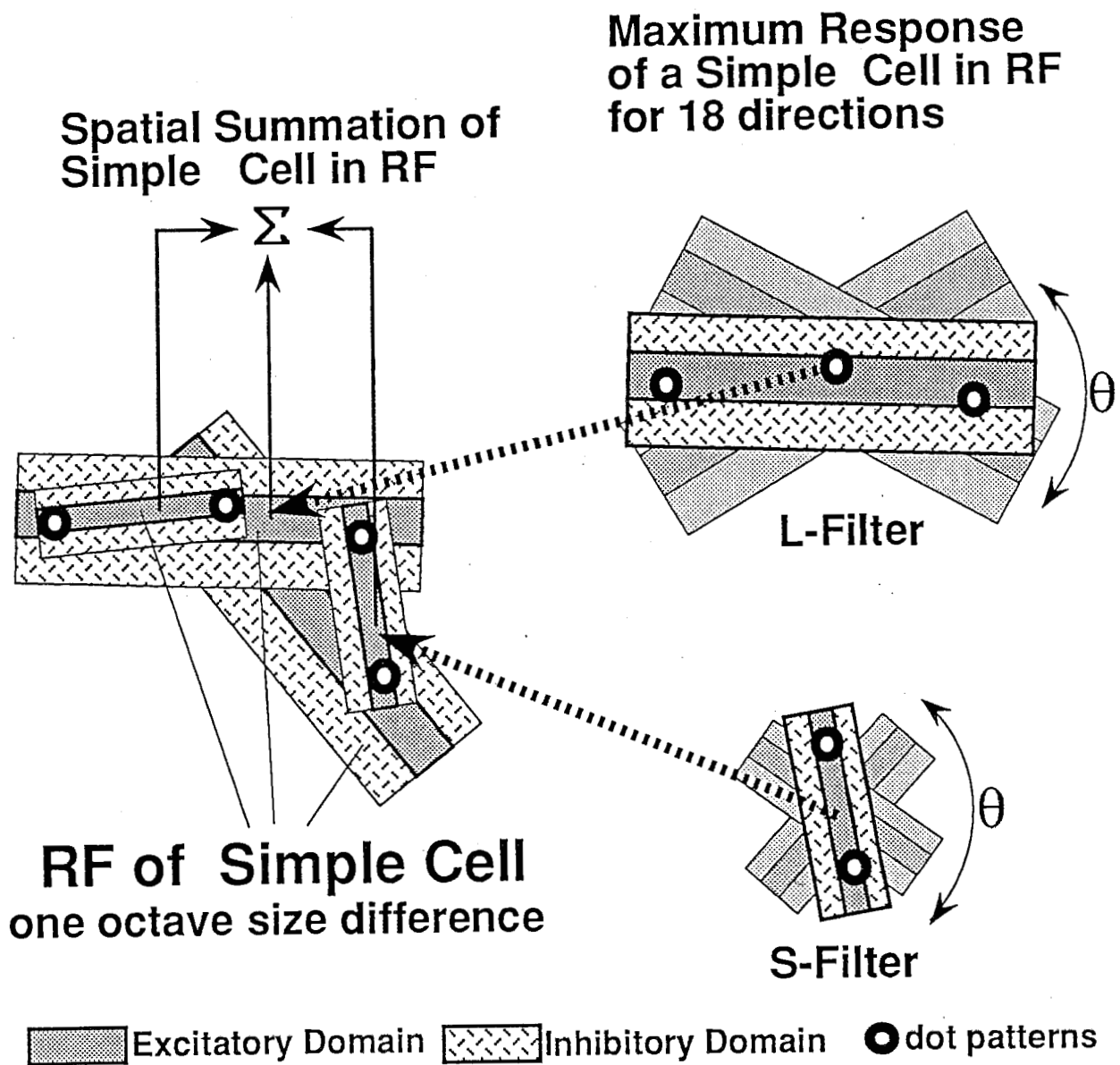
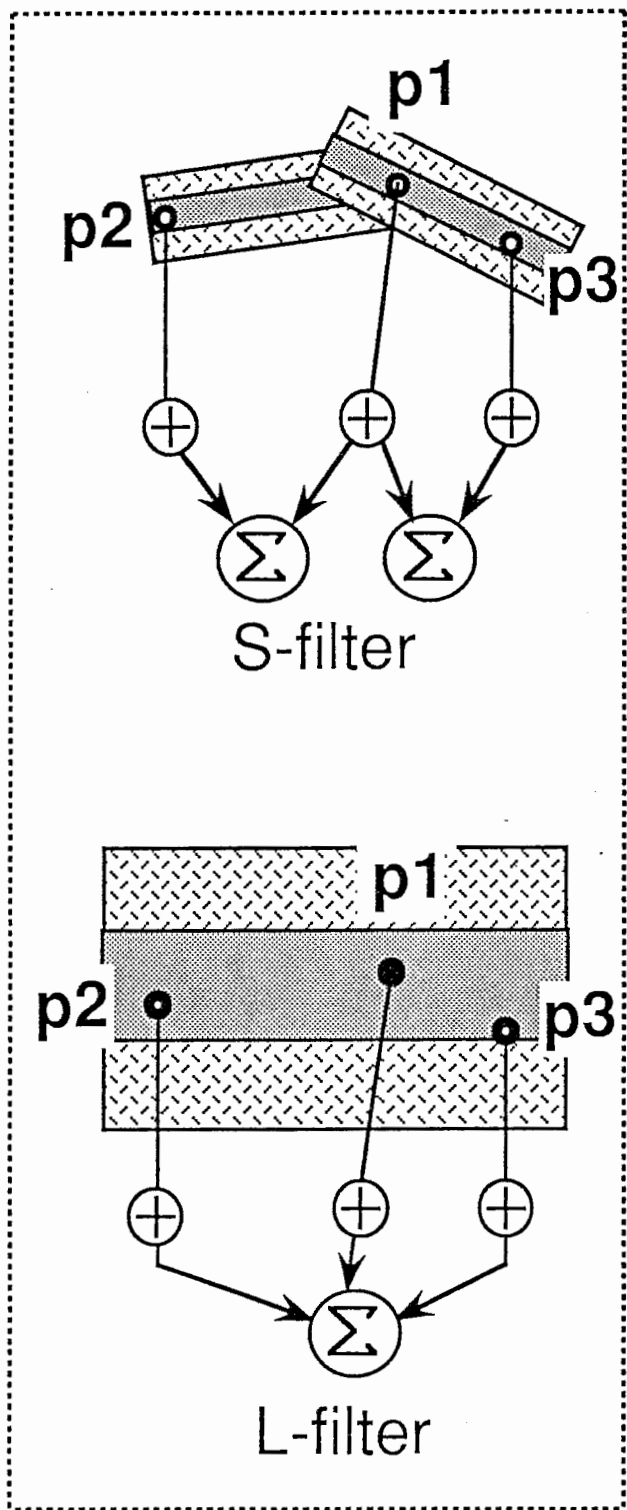
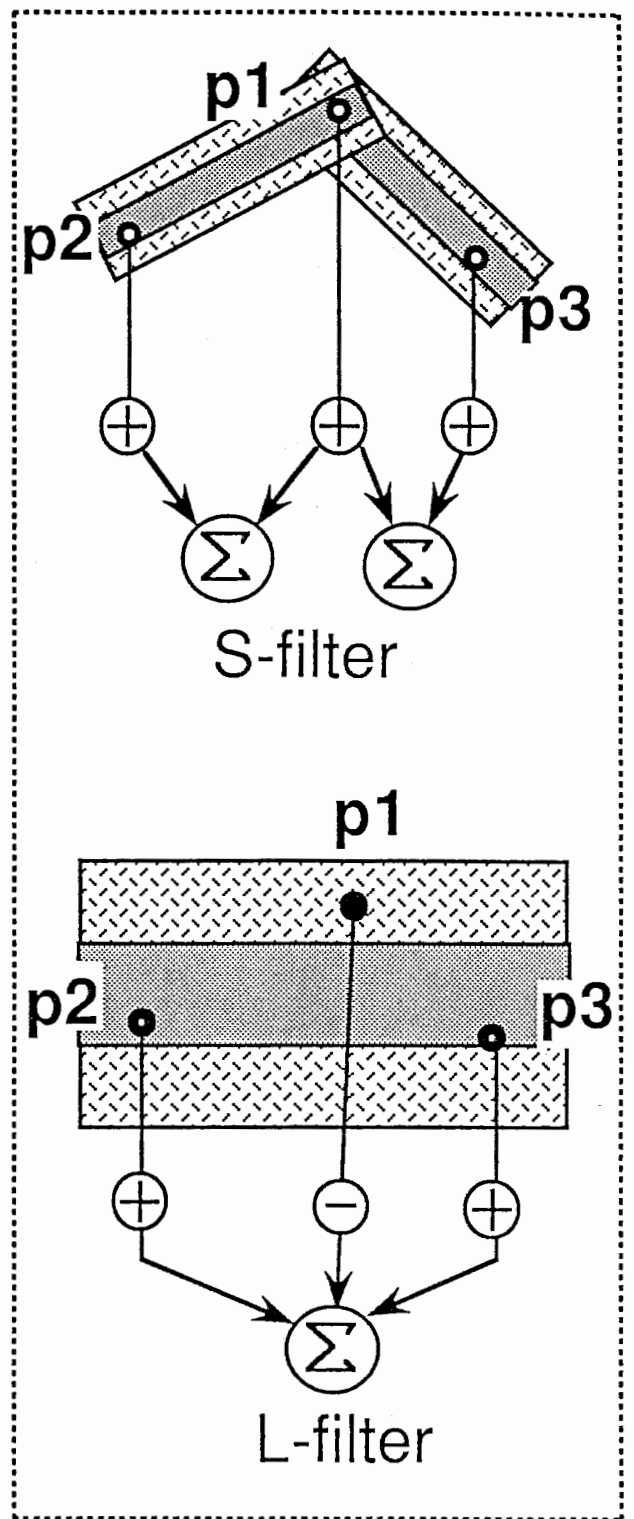


图 5 多重解像度

Fig. 5 Multi-resolution (RF size in octave)



virtual curve (a)



virtual lines (b)

図6 S,Lフィルタによる補間機構

Fig. 6 Mechanism for virtual curve/lines perception by S,L-filter

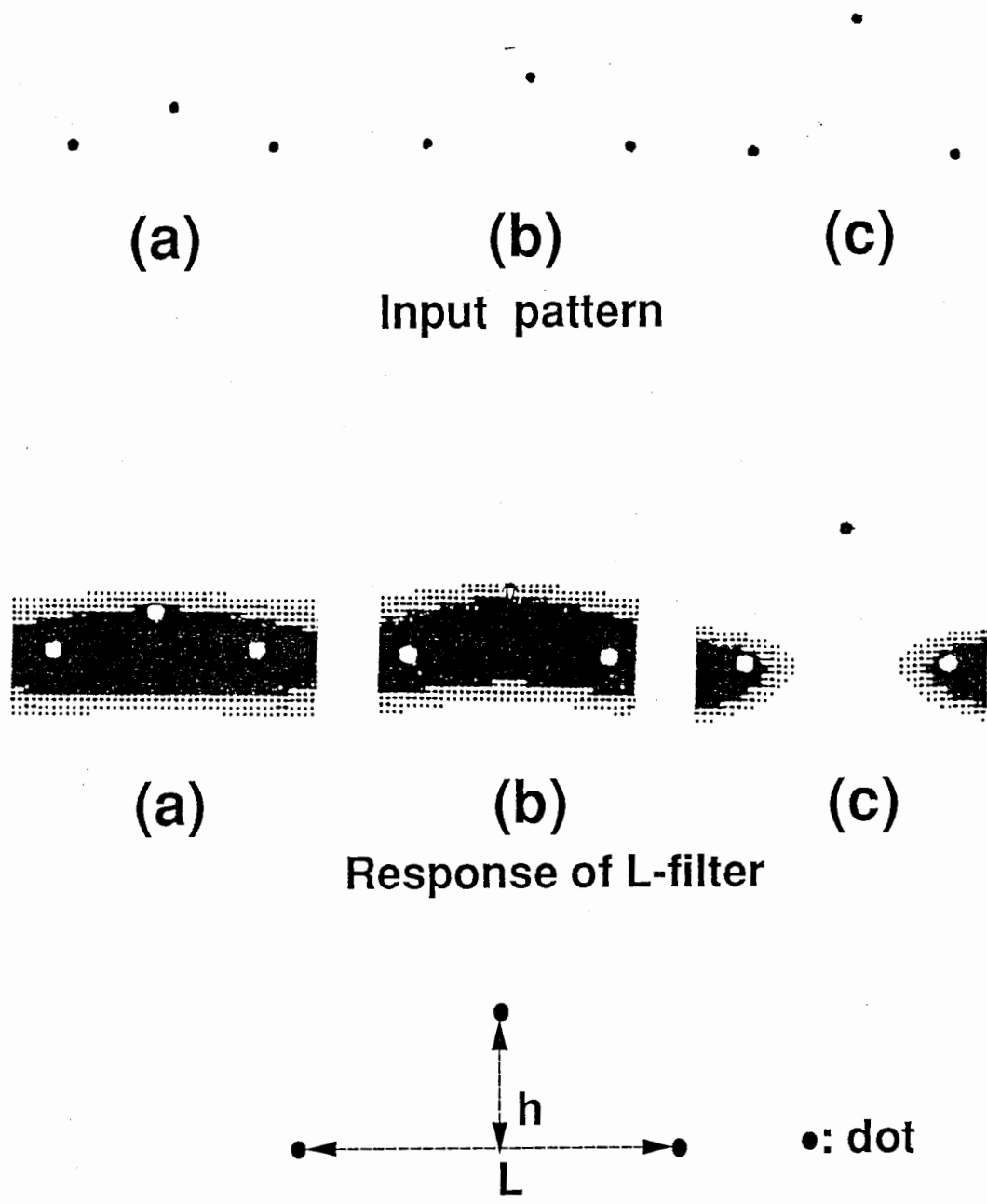
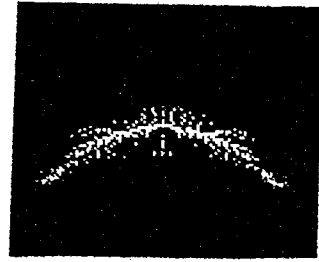
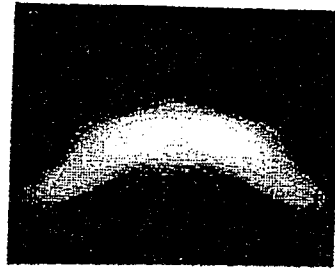
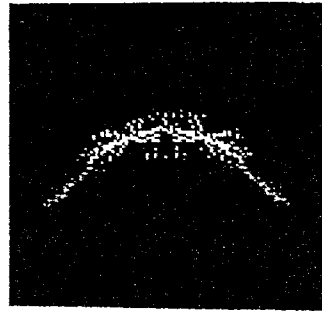
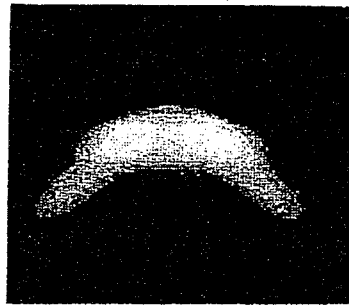


図7 点の位置の変化に対するLフィルタの応答  
 (a)  $L:h = 6:1$  (b)  $L:h = 6:2$  (c)  $L:h = 6:4$   
 $L=120, \sigma_{env}=77, \sigma_{ex}=56, k=2.0$

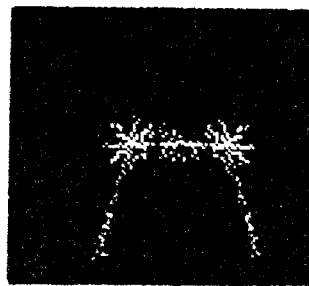
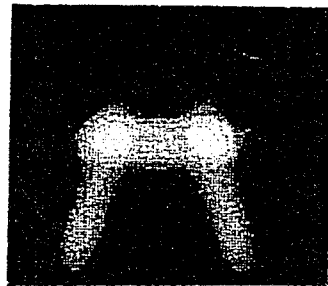
Fig. 7 Response of L-filter for three kinds of dot location



(a)



(b)



(c)

図8 4点の補間のシミュレーション結果 (U1処理)

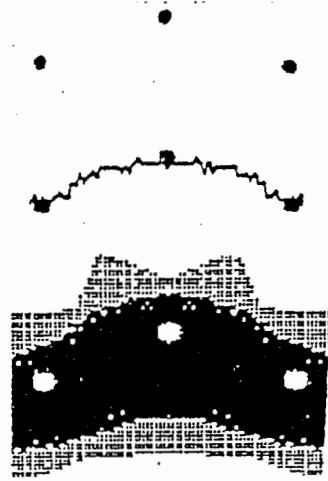
(a)L:h = 120:18 (b)L:h = 120:23 (c)L:h = 120:40

Fig. 8 Simulation for four-dot patterns

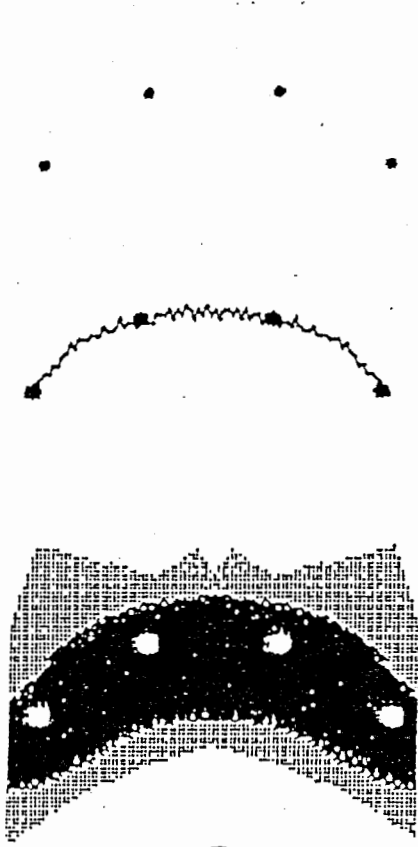




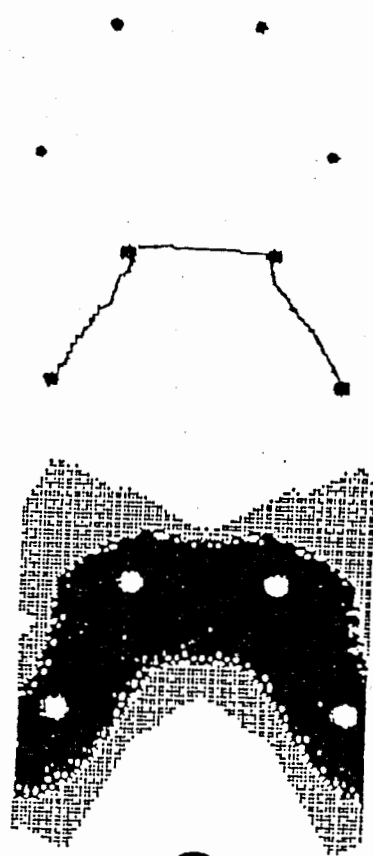
a



b



a



c

図9 3点と4点の補間のシミュレーション結果 (U1とU2処理)  
 (a)  $L:h = 120:18$  (b)  $L:h = 120:23$  (c)  $L:h = 120:40$

Fig. 9 Simulation for three- and four-dot patterns

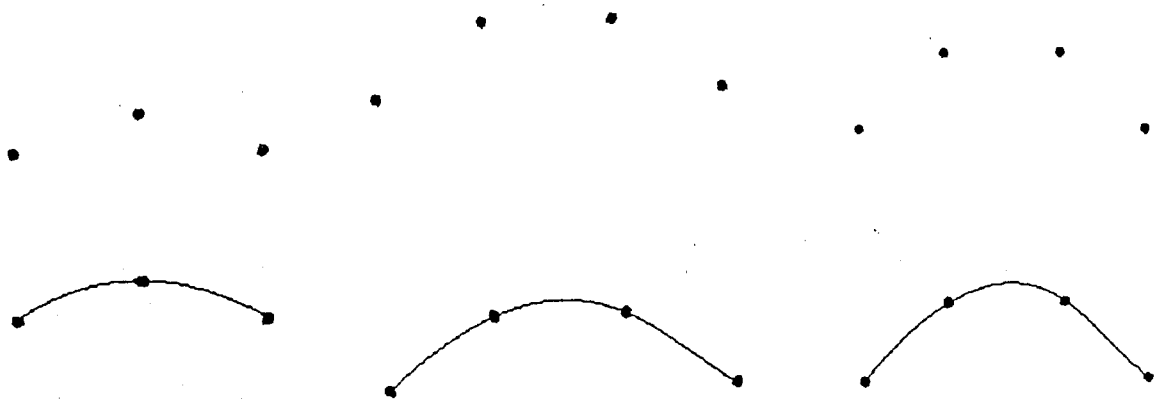


図 10 3次スプライン関数による補間結果

$L:h = 120:18$

Fig. 10 Interpolation by using the cubic spline function

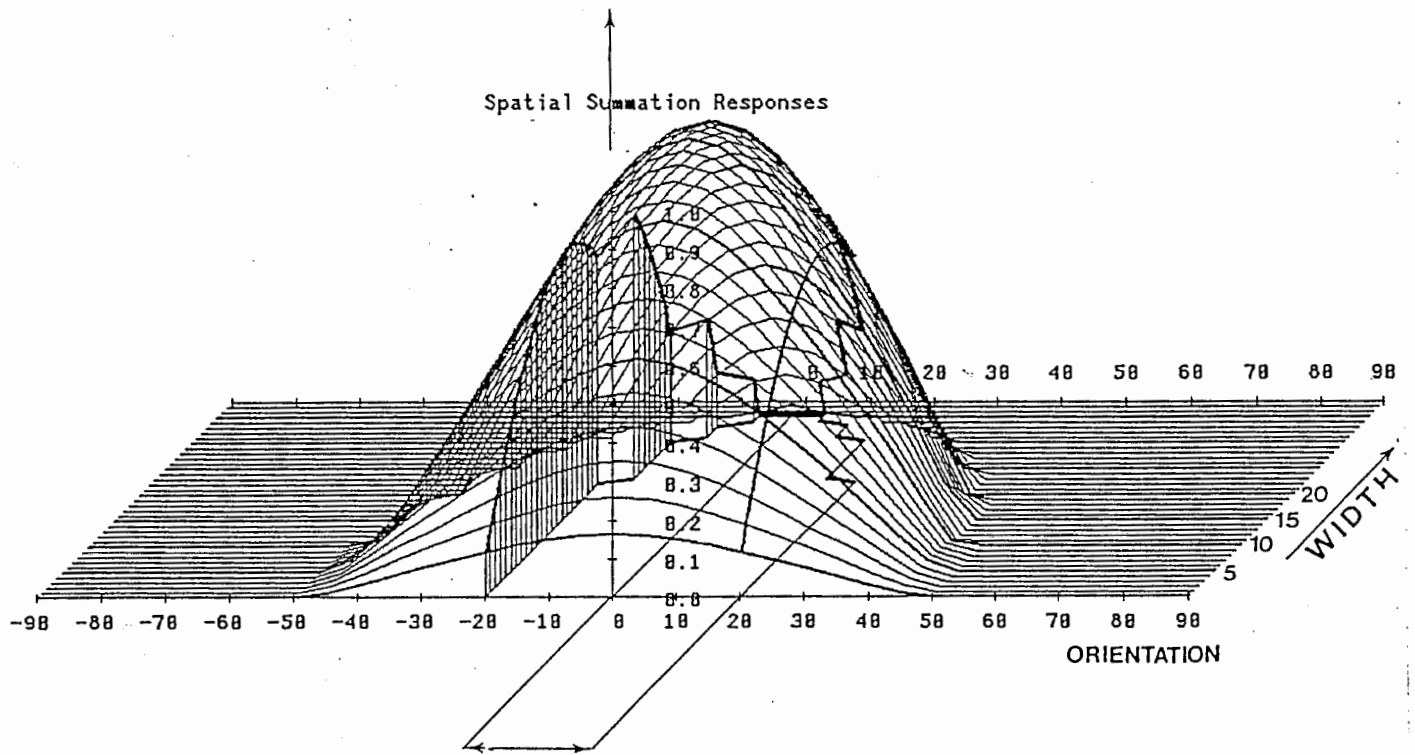


図11 フィルタの方位選択曲線と方位選択幅

横軸は方位で一目盛10°、縦軸は16画素での出力を正規化

Fig. 11 Orientation tuning curves and its width of the filter for various line width

**A Profile of Receptive Field of Simple Cell (differentiation (b))**

**Response of Simple Cell (spatial summation (a))**

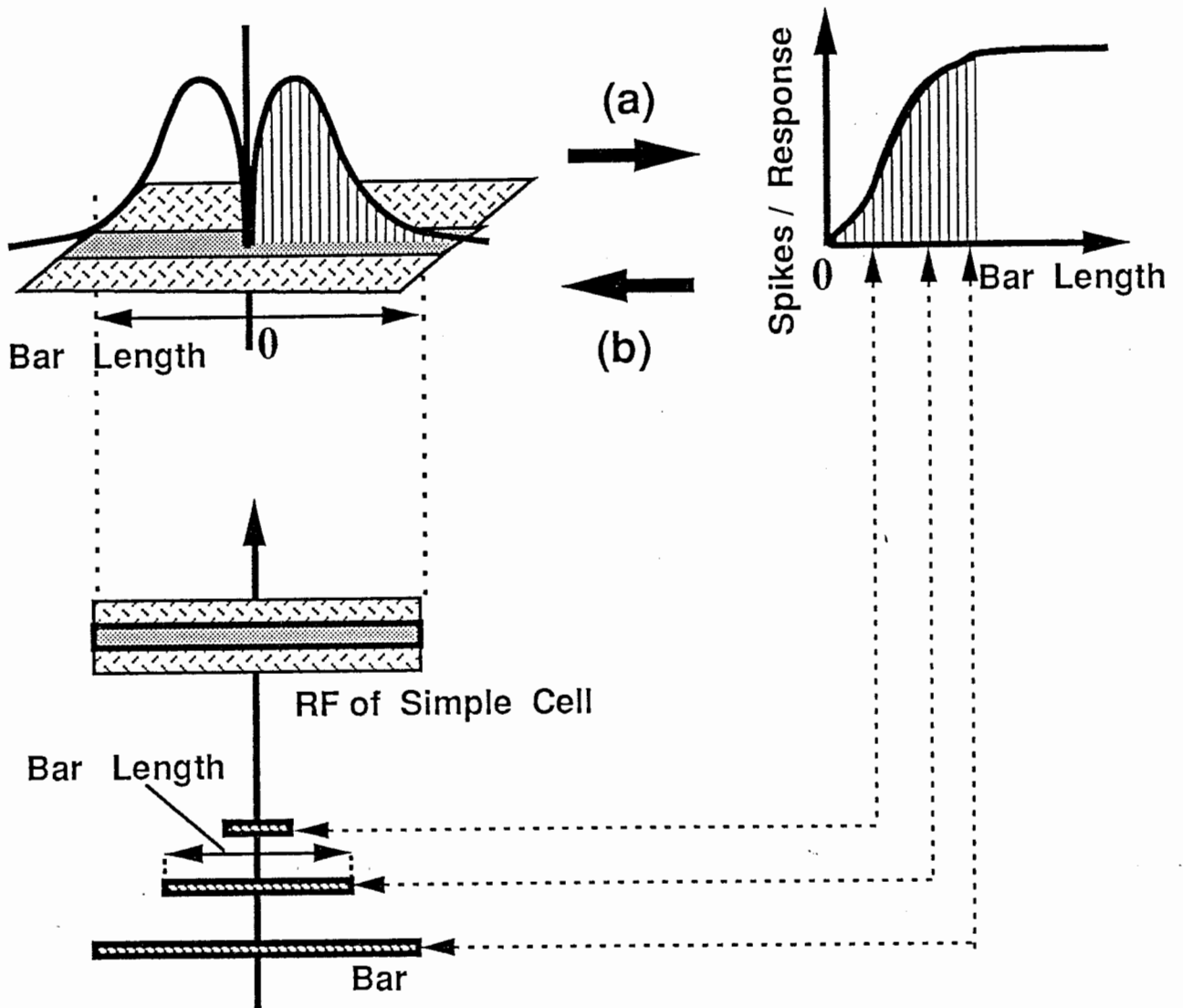
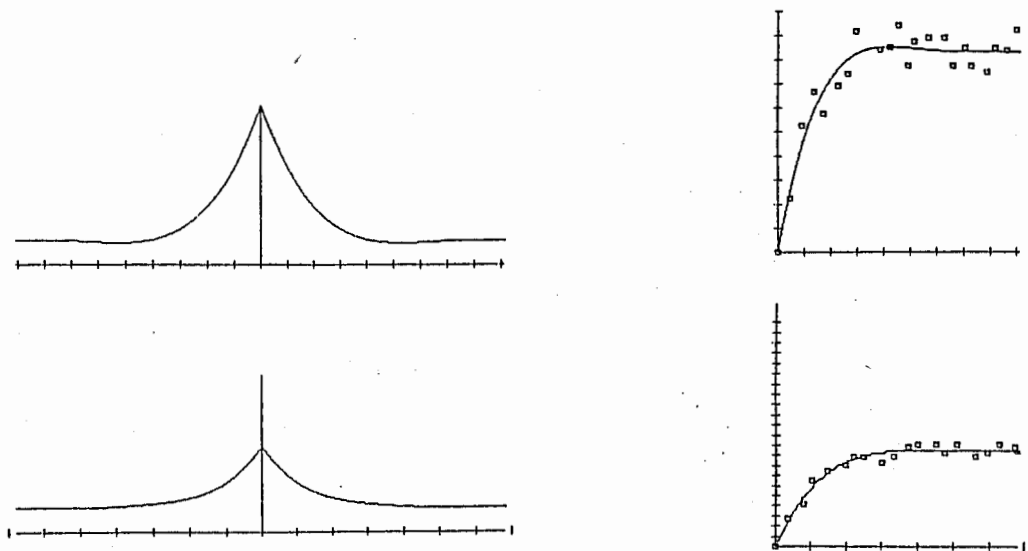
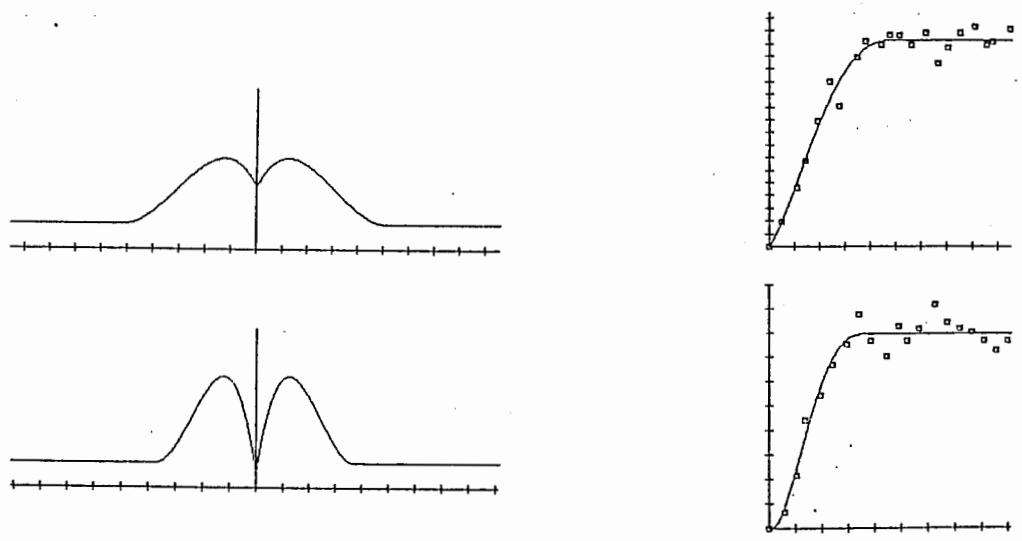


図 1 2 単純型細胞の受容野感度分布と応答との関係

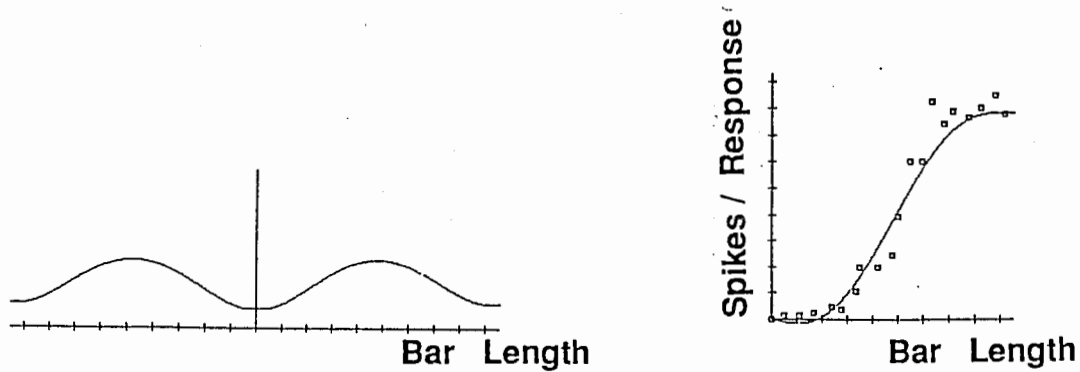
Fig. 12 Relationship between a profile of the RF and its spatial summation of the responses in the RF of a simple cell



単純型細胞の受容野の発火パターン (Type A)



単純型細胞の受容野の発火パターン (Type B)



単純型細胞の受容野の発火パターン (Type C)

図 13 単純型細胞の発火パターンからの受容野分類

Fig. 13 Prediction of the profiles of the RF from responses of simple cells