

フリッカー刺激の方位弁別は刺激が含む 運動方向成分に依存する

久保寺 俊朗*・佐藤 隆夫**

* 東京大学 インテリジェント・モデリング・ラボラトリー

〒 113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16

** 東京大学大学院 人文社会系研究科

〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

(受付：2005年10月3日；改訂稿受付：2005年12月5日；受理：2005年12月21日)

Orientation Discriminations with Flickering Stimuli Based on Directional Components

Toshio KUBODERA* and Takao SATO**

*Intelligent Modeling Laboratory, The University of Tokyo

2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

**Graduate School of Humanities and Sociology, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

(Received 3 October 2005; Received in revised form 5 December 2005; Accepted 21 December 2005)

Derrington and Henning (1981)¹⁾ reported that orientation discrimination performance has a low-pass spatial frequency characteristic, and argued that a mechanism for spatial pattern processing functions at fairly low spatial frequencies. To test their claim, we measured spatial frequency characteristics for orientation discrimination using vertical and horizontal Gabor patches with either counter-phasing or on-off temporal modulation. The results showed that the orientation discrimination sensitivity for counter-phasing stimuli was about twice that for on-off patterns at low spatial frequencies. These results indicate that orientation discriminations in these conditions are based on the directional components contained in the temporally modulated patterns instead of pattern information that is related to total depth of modulation.

1. 序 論

さまざまな空間周波数をもつ正弦波格子の検出閾から、視覚系の空間周波数に対するコントラスト感度関数が求まる。通常、静止刺激に対するコントラスト感度関数は、3cpdから5cpdで感度が最大となる帯域通過特性をもつ²⁾。

これに対して、位相反転刺激やドリフト運動刺激などの時間変調刺激に対するコントラスト感度関数は、低空間周波数で感度が最大となる低域通過特性を示す³⁻⁵⁾。すなわち、時間周波数の増加に伴い、低空間周波数に対する感度の

低下がなくなる。したがって、静止刺激に対するコントラスト感度関数と比較すると、時間変調刺激に対するコントラスト感度関数は、高空間周波数に対する感度がわずかに低下する一方で、低空間周波数に対する感度が大きく上昇する³⁻⁵⁾。

この閾値付近での時間変調刺激の見えは、刺激の時空間周波数に依存して大きく変化する⁶⁻⁹⁾。閾値付近での、さまざまな時空間周波数をもつ時間変調刺激の見えは、空間的なパターンが見える場合と時間的なフリッカーや運動が見える場合とに大別できる^{10,11)}。通常、時間変調刺激

の空間周波数が高い場合は、時間変調があるにもかかわらず静止したパターンが見える。一方、時間変調刺激の空間周波数が低い場合は、空間変調があるにもかかわらずパターンの知覚を伴わないフリッカーや運動のみが見える。

通常の検出課題では、被験者は空間的なパターンと時間的なフリッカーや運動とのどちらを判断基準としても良い。ただし、判断基準をパターンとフリッカーや運動とのどちらか一方に限定することもできる¹¹⁾。この場合、パターンとフリッカーや運動とのどちらを判断基準とするかに依存して、時間変調刺激に対するコントラスト感度関数は大きく変化する^{7,8)}。パターンを判断基準とした場合、時間変調刺激に対するコントラスト感度関数は、5cpd付近で感度が最大となる帯域通過特性をもつ⁸⁾。つまり、パターンを判断基準とした場合、時間変調刺激に対しても低空間周波数での感度の低下が起きる。一方、フリッカーや運動を判断基準とした場合、時間変調刺激に対するコントラスト感度関数は、低空間周波数で感度が最大となる低域通過特性を示す⁸⁾。したがって、パターンを判断基準としたコントラスト感度関数とフリッカーや運動を判断基準としたコントラスト感度関数とを比較すると、高空間周波数ではフリッカーや運動よりパターンに対する感度が高い。逆に、低空間周波数ではパターンよりフリッカーや運動に対する感度が高い。この判断基準に依存したコントラスト感度関数の変化は、閾値付近での時間変調刺激の見えと合致する。また、通常の検出課題に対するコントラスト感度関数は、パターンとフリッカーや運動とに対する感度のうち、感度がより高いものをつないだ関数と一致する⁸⁾。

この二つの判断基準に対するコントラスト感度関数が異なる特性をもつことから、視覚系には静止パターンの検出にかかわるメカニズム(パターンメカニズム)とフリッカーや運動の検出にかかわるメカニズム(フリッカーまたはモーションメカニズム)の二つのメカニズムが並列して存在するという仮説が提出された⁷⁻⁹⁾。パ

ターンメカニズム、フリッカー(モーション)メカニズムは、それぞれの時空間周波数特性から、定常系、過渡系とも呼ばれる。定常系は高空間周波数・低時間周波数の刺激に対して高い感度をもち、空間的情報のみを処理すると考えられる。したがって、閾値付近ではフリッカーや運動を伴わないパターンが見えると考えられる。一方、過渡系は低空間周波数・高時間周波数の刺激に対して高い感度をもち、時間的情報のみを処理すると考えられる。したがって、閾値付近ではパターンを伴わないフリッカーや運動が見えると考えられる。

ところが、方位弁別を判断基準とした場合、位相反転刺激に対するコントラスト感度関数は低空間周波数に対する感度の低下が弱くなる¹⁾。DerringtonとHenning(1981)¹⁾は、さまざまな空間周波数をもつ位相反転刺激に対して、垂直方位と水平方位の弁別に必要なコントラストを測定した。すると、位相反転刺激に対する方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数は、パターンを判断基準としたコントラスト感度関数と比較して、低空間周波数に対する感度の低下が弱くなった。そのうえ、方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数と検出閾から求めたコントラスト感度関数は、ほぼ同一の関数であった¹⁾。

DerringtonとHenning(1981)¹⁾は、この方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数の空間周波数特性から、刺激の判断基準を根拠とした二つのメカニズムが並列して存在するという仮説⁷⁻⁹⁾に疑問を投げかけている。通常、方位の弁別は空間パターン情報に関する問題である。したがって、定常系が働くと考えると、位相反転刺激に対しても低空間周波数での感度の低下が起きることが予想される。しかしながら、この予測とDerringtonとHenning(1981)¹⁾の結果とは一致しない。

しかしながら、方位特性を持つ位相反転刺激は、その方位と直交する方向に二つの運動成分をもつ。ゆえに、位相反転刺激の方位が異なれば、その運動方向成分は異なる。したがって、

表面上、課題が空間パターンに関する問題であり、被験者が主観的には空間パターンの区別を行っていたとしても、内部的に用いられた情報は空間パターン情報であるとは限らない。すなわち、被験者が課題を解くために用いられた刺激情報は、刺激全体の振幅に関連するパターン情報ではなく、時間変調成分であった可能性がある。

そこでわれわれは、位相反転刺激とオンオフ刺激の2種類の時間変調刺激^{8,12)}に対して、方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数を測定した。この二つの刺激は全体の振幅は等しいが、刺激に含まれる運動方向成分の振幅は異なる。したがって、もしこうした実験における方位弁別が時間変調刺激がもつ運動成分に依存する場合には、位相反転刺激とオンオフ刺激とに対するコントラスト感度関数が異なると考えられる^{8,12)}。

2. 予 測

位相反転刺激はその方位と直交する二つの運動方向成分を含む。位相反転刺激に含まれる各運動方向成分の振幅は刺激全体の振幅の1/2となる。また、オンオフ刺激は、その方位と直交する二つの運動方向成分に加えて静止成分を含む。オンオフ刺激に含まれる各運動方向成分の振幅と静止成分の振幅は、それぞれ刺激全体の振幅の1/4と1/2となる。したがって、位相反転刺激は、オンオフ刺激に含まれる運動方向成分の2倍の振幅をもつ運動方向成分から成り立っている。

刺激の方位弁別が刺激の空間情報（パターン）に依存するものであれば、方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数は刺激全体の振幅に基づいたものになると考えられる。この場合、位相反転刺激全体の振幅とオンオフ刺激全体の振幅は等しいことから、位相反転刺激に対する感度とオンオフ刺激に対する感度は等しくなると予想される^{8,12)}。

一方、刺激の方位弁別が刺激の時間情報（運動）に依存するものであれば、方位弁別を判断

基準としたコントラスト感度関数は刺激が含む運動方向成分の振幅に基づいたものになると考えられる。この場合、位相反転刺激の運動方向成分の振幅はオンオフ刺激の運動方向成分の振幅の2倍となることから、位相反転刺激に対する感度はオンオフ刺激に対する感度の2倍になると予想される（時間変化を考えても、位相反転刺激が含む明暗の変化の振幅は、オンオフ刺激が含む明暗の変化の振幅の2倍となるため、位相反転刺激に対する感度はオンオフ刺激に対する感度の2倍になると予想される）^{8,12)}。

3. 方 法

3.1 被験者

筆者の1人を含む3名が被験者を務めた。すべての被験者は正常な視力もしくは矯正視力をもっていた。

3.2 装置

すべての刺激をPCで制御した視覚刺激提示装置（Cambridge Research Systems VSG2/4）を使って作成し、17inchのCRT（SONY GDM-17SE2T）に提示した。CRTの時間解像度は100Hzとした。また観察距離を32cmとしたため、1pixelが視角3minに相当した。さらに15-bitのlook-up tableを用いてガンマ補正を行った。被験者は顎台で頭部を固定して両眼で刺激を観察し、すべての実験を暗室で行った。

3.3 刺激

垂直方位と水平方位のガボールパッチ（以下ではGPと省略する）を刺激とした。GPの振幅は式(1)で定義した。

$$G(x, y) = \cos [2\pi f_s (x \cos \theta + y \sin \theta)] \exp(-x^2/\sigma_x^2) \exp(-y^2/\sigma_y^2) \quad (1)$$

式(1)で x は水平軸上の位置を、 y は垂直軸上の位置を表している。GPの大きさを決める空間定数 $(\sigma_x \cdot \sigma_y)$ は5degとした。また θ が0degのときは垂直方位のGP、90degのときは水平方位のGPとなる。GPの空間周波数 (f_s) は0.2cpdから2.24cpdの範囲とし、1/2オクターブの間隔で8つの空間周波数を使用した。

式(1)で定義したGPの振幅に式(2)で定

義した時間変調を加えた。したがって、式 (2) は GP の輝度分布を表している。

$$L(x, y, t) = L_0[1 + m \cos(2\pi f_i t) \exp(-t^2/\sigma_i^2) G(x, y)] \quad (2)$$

式 (2) で L_0 は平均輝度を、 m はコントラストを表している。時間定数 (σ_i) は 150ms とした。また GP の時間周波数 (f_i) は 0Hz (静止刺激) と 8Hz (位相反転刺激) とした。これらに加えて、GP と一様な背景が切り替わる刺激を作成した。これはオンオフ刺激と呼ばれるもので、式 (3) で定義した。

$$L(x, y, t) = L_0\{1 + m[0.5 + 0.5 \cos(2\pi f_i t)] \exp(-t^2/\sigma_i^2) G(x, y)\} \quad (3)$$

式 (3) で定義したオンオフ刺激の時間周波数 (f_i) は、位相反転刺激と同じ 8Hz とした。またそれ以外の定数も式 (2) と同じものを使用した。

3.4 手続き

時間的な 2 肢強制選択法と変形階段法を用いて、GP の方位弁別に必要となるコントラストを測定した。被験者は、GP の平均輝度をもつ一様な刺激面に 5 分間順応した後、実験を開始した。被験者は画面の中央に提示された注視点に視線を向けた後、ボタンを押して試行を始めた。試行が始まると、注視点を消し、500ms のブランクを挟んで、1 回目の刺激を提示した。続いて 750ms のブランクを挟んで、2 回目の刺激を提示した。1 回目の提示と 2 回目の提示では異なる方位の GP を提示した。したがって、1 回目に垂直方位の GP を提示した場合には 2 回目に水平方位の GP を提示し、1 回目に水平方位の GP を提示した場合には 2 回目に垂直方位の GP を提示した。被験者の課題は提示された方位の順序を答えることであった。被験者の間違った反応に対しては、ブザーを使ってフィードバックを与えた。試行中、被験者は常に GP が提示される場所を注視していた。

提示する GP のコントラストは変形階段法を用いて制御した。被験者が 3 回連続して正答すると GP のコントラストを下げ、被験者が 1 回でも間違えると GP のコントラストを上げた。1

回目と 2 回目の反転までのステップの大きさはそれぞれ 0.2log と 0.1log とし、それ以降のステップの大きさは 0.05log とした。6 回目の反転が起きた段階で測定を終了し、最後から 4 回分の反転が起きた測定値の平均値を GP の方位弁別に必要となるコントラストとした。このコントラストでの方位弁別の正答率は 79% となる¹³⁾。

8 系列の変形階段法を並列に行うことで、1 回の測定で 8 つの空間周波数に対する測定を同時に行った。各空間周波数の刺激はランダムな順番で提示した。3 種類の時間変調刺激 (静止刺激・位相反転刺激・オンオフ刺激) のそれぞれに対してこれらの測定を 4 回ずつ行い、そこで得られたコントラストの平均値を最終的な GP の方位弁別に必要となるコントラストとした。

4. 結 果

図 1 は、方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数を被験者ごとに表したものである。方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数は、さまざまな空間周波数をもつ GP の方位弁別に必要となるコントラストから求まる。グラフの縦軸は方位弁別でのコントラスト感度を、横軸は GP の空間周波数を表す。シンボルは刺激の時間変調パターンを示し、□ は位相反転刺激を、◇ はオンオフ刺激を、◆ は静止刺激をそれぞれ表している。

方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数は GP の時間変調パターンに依存した。静止刺激に対する方位弁別を基準としたコントラスト感度関数は、空間周波数が低くなるにつれて低下した。一方、位相反転刺激の場合、空間周波数の低下に伴う方位弁別を基準としたコントラスト感度の低下は、静止刺激のそれと比較して小さかった。したがって、空間周波数が低くなると、位相反転刺激に対する感度が静止刺激に対する感度より高くなった。位相反転刺激では空間周波数の低下に伴う感度低下は生じるものの、静止刺激のそれと比較すると感度低下が小さいという点は、Derrington と Henning

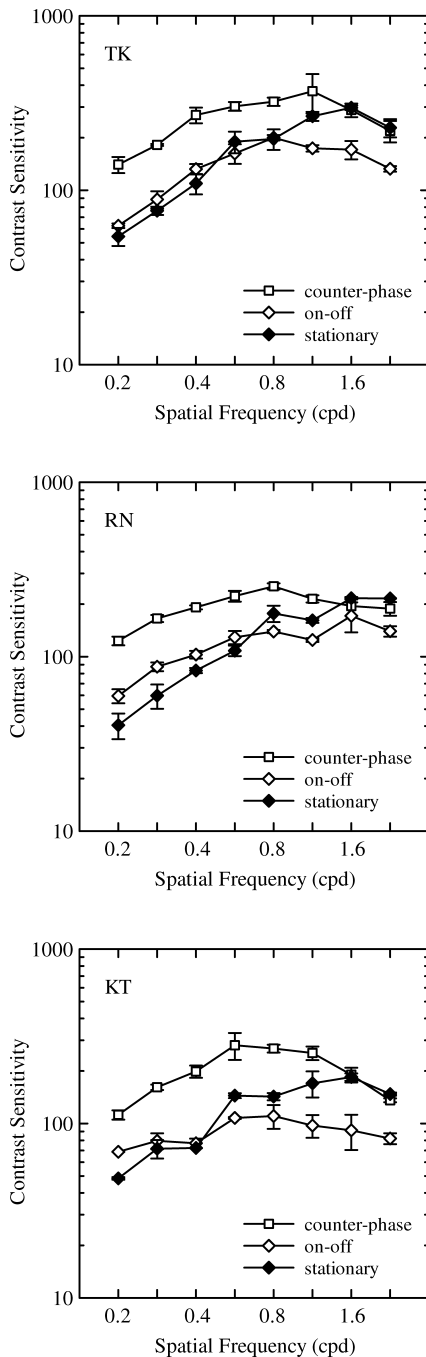


図1 方位弁別を判断基準とした各被験者のコントラスト感度関数。グラフの縦軸は方位弁別でのコントラスト感度を、横軸はGPの空間周波数を表す。シンボルは刺激の時間変調パターンを示し、□は位相反転刺激を、◇はオンオフ刺激を、◆は静止刺激をそれぞれ表している。エラーバーは±1 SEを示す。

(1981)¹⁾の結果と類似していた。また、オンオフ刺激の場合も位相反転刺激の場合と同様に、空間周波数の低下に伴う方位弁別を基準としたコントラスト感度の低下は、静止刺激のそれと比較して小さかった。

次に、位相反転刺激に対する感度とオンオフ刺激に対する感度を比較するため、位相反転刺激のオンオフ刺激に対する感度比を被験者ごとに求めた。図2は、方位弁別を判断基準としてコントラスト感度を求めたときの、位相反転刺激に対するコントラスト感度とオンオフ刺激に対するコントラスト感度の比を表している。各シンボルは被験者ごとの感度比を示し、実線は被験者3名の平均を示す。図2より、空間周波数が高くなるにつれて感度比は低下するものの、位相反転刺激に対する感度とオンオフ刺激に対する感度の比はおおよそ2となることがわかった。

5. 考 察

静止刺激に対する方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数は、2.24 cpd以下の範囲で、空間周波数が低くなるにつれて低下した。一方、位相反転刺激を提示した場合は、空間周波数の低下に伴う方位弁別を基準としたコントラスト感度の低下は、静止刺激のそれと比較して小さかった。これらの結果は、DerringtonとHenning (1981)¹⁾の結果と類似していた。したがって、われわれは、本研究の被験者が方位弁別を行うために用いた刺激情報は先行研究の被験者が用いた刺激情報と同じものであったと考える。

ただし、位相反転刺激に対する本研究の結果は、DerringtonとHenning (1981)¹⁾の結果と比較すると、空間周波数の低下に伴う感度低下が大きかった。一定の大きさの刺激を用いて空間周波数を低くすると、空間周波数とともに提示される格子の数も減少する。通常は、提示される格子の数が多いほど感度は高くなり安定する¹⁴⁾。本研究では空間定数が5 degのガボールパッチを用いたため、15 deg四方の正弦波格子を刺激としたDerringtonとHenning (1981)¹⁾

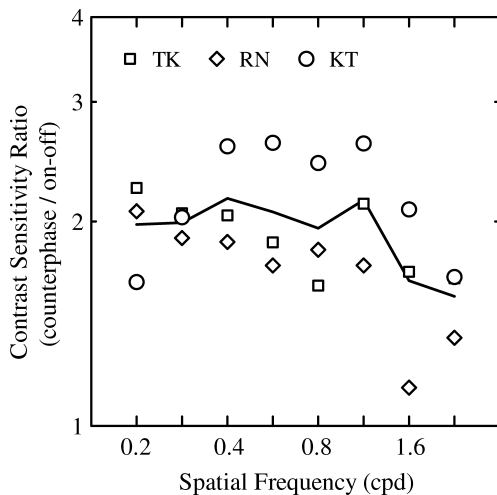


図2 位相反転刺激に対するコントラスト感度とオンオフ刺激に対するコントラスト感度の比。グラフの縦軸は方位弁別でのコントラスト感度比を、横軸はGPの空間周波数を表す。各シンボルは被験者ごとの感度比を示し、実線は被験者3名の平均を示す。

と比較すると、提示される格子の数が少なかった。したがって、提示される格子の数が少ないため、空間周波数の低下に伴う感度低下が大きかった可能性が高い。

また、位相反転刺激を提示した場合のオンオフ刺激を提示した場合に対する感度比はおおよそ2となった。予測で述べたとおり、位相反転刺激はオンオフ刺激に含まれる運動方向成分の2倍の振幅をもつ運動方向成分から成り立っている。したがって、われわれは、本研究の方位弁別課題は時間変調刺激が含む運動方向成分に依存した課題であったと考える。

加えて、オンオフ刺激が含む静止成分の振幅は静止刺激が含む静止成分の振幅の1/2であるにもかかわらず、低空間周波数領域では、オンオフ刺激に対する感度は静止刺激に対する感度よりも高かった。ゆえに、われわれは、低空間周波数領域における方位弁別課題がフリッカー刺激が含む静止成分に依存しない課題であったと考える。ただし、空間周波数の増加に伴い、静止刺激に対する感度と位相反転刺激に対する感度が等しくなることからわかるように、空間

周波数の増加に伴い、静止成分の寄与は高まる。したがって、われわれは、空間周波数の増加に伴い、位相刺激とオンオフ刺激の感度比率は1に近づくと考える。

これらのことから、われわれは、本研究の被験者と Derrington と Henning (1981)¹⁾ の研究の被験者が方位弁別を行うために用いた情報は時間変調刺激に含まれる時間的変化に関する情報であったと考える。時間変調刺激の方位が異なれば、その運動方向成分により活性化する内部のメカニズムは異なる。もし被験者がこの違いを利用することができるならば、方位弁別を判断基準としたコントラスト感度関数が低域通過型に近い特性を示すことは十分に考えられる。したがって、われわれは、こうした事態における「方位弁別」が低空間周波数・高時間周波数領域で高い感度を示すことは、定常系が空間的情報を処理し、過渡系が時間的情報を処理するという仮説⁷⁻⁹⁾と矛盾するものではないと考える。

さらに、運動検出メカニズムが空間パターンの処理に関与する可能性もある。Derrington と Henning (1981)¹⁾ も触れているが、方向弁別には方位情報が必要となる。実際に、運動検出器のモデルの多くが、特定の方位、空間周波数に応答する空間フィルターを備えている¹⁵⁾。また、運動方向に選択的な細胞は、特定の方位、空間周波数に応答する受容野をもっている¹⁶⁾。したがって、われわれは、運動検出メカニズムが方位性をもつならば、運動方向成分をもつ刺激の方位判断も可能であり、そのため方位弁別の空間特性は低域通過型に近い特性をもつと考える。

文 献

- 1) A. M. Derrington and G. B. Henning: Pattern discrimination with flickering stimuli. *Vision Research*, **21**, 597-602, 1981.
- 2) O. H. Schade: Optical and photoelectric analog of the eye. *Journal of the Optical Society of America*, **46**, 721-739, 1956.
- 3) J. G. Robson: Spatial and temporal contrast-

- sensitivity functions of the visual system. *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 1141–1142, 1966.
- 4) D. H. Kelly: Flickering patterns and lateral inhibition. *Journal of the Optical Society of America*, **59**, 1361–1370, 1969.
 - 5) D. H. Kelly: Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surface. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1340–1349, 1979.
 - 6) F. L. van Nes, J. J. Koenderink, H. Nas and M. A. Bouman: Spatiotemporal modulation transfer in the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, **57**, 1082–1088, 1967.
 - 7) U. T. Keeseey: Flicker and pattern detection: A comparison of thresholds. *Journal of the Optical Society of America*, **62**, 446–448, 1972.
 - 8) J. J. Kulikowski and D. J. Tolhurst: Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision. *Journal of Physiology*, **232**, 149–162, 1973.
 - 9) D. J. Tolhurst: Separate channels for the analysis of the shape and the movement of moving visual stimulus. *Journal of Physiology*, **231**, 385–402, 1973.
 - 10) M. G. Harris: Velocity specificity of the flicker to pattern sensitivity ratio in human vision. *Vision Research*, **20**, 687–691, 1980.
 - 11) N. V. S. Graham: *Visual Pattern Analyzers*. Oxford University Press, 1989.
 - 12) J. J. Kulikowski: Some stimulus parameters affecting spatial and temporal resolution of human vision. *Vision Research*, **11**, 83–93, 1971.
 - 13) H. Levitt: Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of Acoustical Society of America*, **49**, 467–477, 1971.
 - 14) J. G. Robson and N. Graham: Probability summation and regional variation in contrast sensitivity across the visual field. *Vision Research*, **21**, 409–418, 1981.
 - 15) E. H. Adelson and J. R. Bergen: Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 284–299, 1985.
 - 16) G. C. DeAngelis, I. Ohzawa and R. D. Freeman: Spatiotemporal organization of simple-cell receptive fields in the cat's striate cortex. I. General characteristics and postnatal development. *Journal of Neurophysiology*, **69**, 1091–1117, 1993.