

準線形および非線形色運動の分離における ガボール・マイクロパターンの数の有効性

吉澤達也

ニューヨーク大学

(受付：2001年10月6日；改訂稿受付：2002年1月4日；受理：2002年2月1日)

Contribution of the Number of Gabor Micropatterns to Dissociation of Quasi-linear and Nonlinear Chromatic Motion

Tatsuya YOSHIZAWA

Center for Neural Science, New York University

4 Washington Place, Room 809, New York, NY 10003

(Received 6 October 2001; Received in revised form 4 January 2002; Accepted 1 February 2002)

It has been shown that a manipulation of parameters of luminance and chromatic Gabor micropattern kinematogram (GMK) allows us to isolate quasi-linear and nonlinear motion mechanisms. I investigate how GMK with a single micropattern is effective on the isolation. Performance of direction discrimination and detection of motion stimuli were measured with superimposing luminance and chromatic noise on the stimuli. Results illustrate that luminance noise affects quasi-linear but not nonlinear chromatic motion performance, and that chromatic noise masks nonlinear but not quasi-linear chromatic motion identification. These results are similar to those of the previous studies used GMK, indicating that a single Gabor micropattern also has a capability of the isolation of quasi-linear and nonlinear mechanisms for chromatic motion.

1. はじめに

運動視のメカニズムについては様々なモデルが提案されている¹⁻³⁾。刺激の構造により定義される一次(たとえば、輝度変調で定義された刺激による運動)および、二次運動(たとえば、コントラスト変調で定義された刺激による運動)については広く議論が行われており^{2,4)}、それらに応答するメカニズムの存在についても報告されている。また、時空間的なフィルタにより記述できる準線形メカニズムと非線形メカニズムの

存在についても多くの研究が行われている(文献³⁾を参照)。刺激の時空間フーリエパワースペクトルにおける方位成分に応答し、線形な時空間フィルタにより記述できる一次運動メカニズムと、時空間フーリエパワースペクトルに方位成分を持たない刺激に応答する二次運動メカニズムは、定性的にはそれぞれ線形メカニズムと非線形メカニズムに対応する特徴を持つ¹⁻⁵⁾。Boulton and Baker⁵⁾はGabor関数により定義されるパターンで構成される一群のパターン(Gabor Micropattern Kinematogram: GMK)の時

空間パラメータを操作することにより準線形メカニズムと非線形メカニズムが存在することを報告している。一般に運動視メカニズムを分離する実験ではそれぞれ異なった時空間特性を持つ刺激が用いられてきた。たとえば、一次運動の分離のために輝度変調グレーティングを、二次運動のためにコントラスト変調グレーティングが用いられている。そのため、刺激自身と対象のメカニズムが不可分で論じられなければならない。これに対し、Boulton and Baker⁵⁾の刺激是一群中の個々のガボール・マイクロパターンの空間パラメータは分離対象のメカニズムに対して独立であり、運動視メカニズムの存在を言及するのに適していると報告している。

運動視メカニズムの一つの問題として色情報の運動視メカニズムへの寄与、または色運動視メカニズムに関する議論が行われている。Livingstone and Hubel⁶⁾は色情報が運動視メカニズムにあまり寄与しないことを報告している。等輝度の時に刺激の運動の方向を識別することが輝度差のある刺激の場合より困難であるという知見⁷⁾や、等輝度のグレーティング刺激の運動速度は、輝度グレーティングのそれより遅く知覚されるという知見⁸⁻¹⁰⁾などは、これを支持している。しかし、これらの知見に対して近年多くの研究が色情報が運動視メカニズムに寄与していることを報告している¹¹⁻¹⁵⁾。たとえば、Cropper and Derrington¹²⁾は等輝度の正弦波グレーティング刺激(1次運動刺激)を短時間呈示(17ms)したときでも運動が知覚されることを報告している。一方、Baker, Boulton and Mullen¹⁴⁾は、Boulton and Baker⁵⁾と同様の刺激、ただし等輝度の刺激を用いて、色運動のメカニズムを準線形と非線形という2分法的な観点から調べ、非線形色運動メカニズムの存在について報告している。また、Yoshizawa, Mullen and Baker¹⁵⁾は、輝度および等輝度の準線形、非線形運動刺激(一群のガボール・マイクロパターンで構成される)に輝度または等輝度色ノイズを加え、ノイズのコントラストを変えて運動知覚検出閾値と刺激検出閾値に及ぼす影響を調べた。その結果、準

線形色運動の検出は輝度ノイズの影響を受けるが、刺激自身の検出は影響されない。一方、等輝度色ノイズは刺激自身の検出に影響するが準線形色運動の検出には影響しない。これに対して、非線形色運動の場合、輝度ノイズは運動検出及び刺激検出に影響を及ぼさないが、等輝度色ノイズはどちらの検出にも影響を及ぼす。これらのことから、色運動においては非線形メカニズムだけが存在していることを報告している。さらに、非線形メカニズムの存在を支持する結果が等輝度の正弦波グレーティングを用いた輝度または等輝度色ノイズによるマスキング効果を調べた研究でも報告されている^{16,17)}。

Bakerら¹⁴⁾またはYoshizawaら¹⁵⁾が使用したGMKは刺激の特性から視野の水平方向に幅広くガボール・マイクロパターンが分布する。つまり、一群のガボール・マイクロパターンで構成される刺激は中心窩だけでなく、限られた範囲ではあるが、その周辺にも呈示される。そのため、実験結果は使用した刺激に対する特有のものである可能性がある。また、ほとんどの先行研究では正弦波グレーティングを、中心窩を中心としたある範囲を刺激するように呈示する実験が行われており、それら先行研究の結果とGMKは刺激を用いた実験結果の違いが刺激布置及びその空間的構造に依存する可能性がある。

そこで、本研究では単一のガボール・マイクロパターンを中心視野付近に呈示した結果とGMKを用いたYoshizawaら¹⁵⁾の結果を比較することにより、色運動メカニズムとGMKの特性の関係について議論する。

最初の実験では準線形運動と非線形運動の分離に重要な要因である方位選択性について調べた。定性的には単一のガボール・マイクロパターンを用いた場合も、方位選択性を調べることにより準線形運動と非線形運動の分離が可能であることがわかった。続く2つの実験では輝度、等輝度色ノイズのマスキング効果を調べた。その結果は単一のガボール・マイクロパターンを用いた場合、輝度ノイズは準線形の等輝度色運動を抑制するが、非線形の等輝度色運動には影響を与えな

い。一方、等輝度色ノイズの効果はその逆で、非線形形の等輝度色運動に影響を与えるが、準線形形の等輝度色運動には影響を与えない。これらのマスキング効果は複数のガボール・マイクロパターンを用いた場合¹⁵⁾と同様の傾向である。

2. 実験

2.1 刺激と装置

Yoshizawa ら¹⁵⁾と同様に次式のGabor関数 $G(x, y)$ で定義される等輝度および輝度のパターンによる2フレーム仮現運動刺激を用いた。

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

ここで θ , λ は搬送波の方向、波長を、 C はコントラストを、 σ_x および σ_y はそれぞれ包絡波の水平、垂直方向の幅を制御する媒介変数である。全実験を通じて λ は視角 1° , σ_x および σ_y は $3/4 \lambda$, 搬送波の空間周波数は 1 cpd であり、等輝度色刺激における色収差の影響を低減している¹⁸⁾。等輝度および輝度のパターンはそれぞれ赤色光と緑色光を反対位相または同位相で変調することにより生成される(詳細はYoshizawa ら¹⁵⁾を参照)。刺激に加えられる輝度ノイズは1次元の動的なノイズである。ガボール・マイクロパターンの初期位置は試行毎ランダムに、スクリーンの中心に視角 1° の範囲にパターンの中心が位置するように呈示された。等輝度色ノイズは1次元のホワイトノイズに対して空間低域通過フィルタ(Butterworth digital filter) 処理をすることにより、色収差の要因である高空間周波数成分を低減した。

すべての刺激および輝度・等輝度色ノイズは計算機により制御されるグラフィックスカード(VSG2/2, Cambridge Research Systems)により生成され、RGB モニター(Barco CCID 7751, SONY GDM-500PS)に呈示された。モニター Barco CCID 7751 の赤色光 r , 緑色光 g の CIE 座標はそれぞれ $r(0.623, 0.340)$, $g(0.278, 0.584)$, モニター SONY GDM-500PS の場合はそれぞれ $r(0.625, 0.342)$, $g(0.296, 0.607)$ である。スクリーンの解像度は 496×428 画素(視距離 100 cm

において、視角 $21.5^\circ \times 16.2^\circ$) である。刺激とマスキングノイズはフレームレート 150 Hz で継続的に呈示される。スクリーンの平均輝度は 6.2 cd/m^2 。

等輝度ガボール・マイクロパターンの等輝度は minimum motion technique を用いて被験者毎に調整された。各被験者はモニタの中心に呈示されたガボール・マイクロパターン(実験刺激と同じ空間特性)の搬送波の運動感覚が最小となるように r と g の輝度比を調整した。このときガボール・マイクロパターンの包絡波成分は移動しない。

2.2 準線形運動メカニズムと非線形運動メカニズムの分離の条件

Baker ら¹⁴⁾ と Yoshizawa ら¹⁵⁾ は GMK の時空間パラメータを変えることにより、準線形運動メカニズムと非線形運動メカニズムが分離されると報告している。

ここでは、ガボール・マイクロパターンの数以外は彼等と同様、それぞれのメカニズムに最適な値を用いた。以下、それぞれの刺激条件を準線形条件、非線形条件と呼ぶ。準線形条件の場合、2フレーム間の ISI は 0 ms , ガボール・マイクロパターンの空間的変位量は搬送波の波長の $1/4$ 。一方、非線形条件の場合は SOA が 150 ms , 空間的変位量は搬送波の波長の 1.5 倍。両条件共に各フレームの持続時間は 100 ms 。また、3.1の実験における各条件での刺激のコントラストは予備実験でそれぞれ得られた刺激検出閾値コントラスト(輝度または等輝度ノイズは加えられていない)より 15.9 dB 高い。

2.3 手続き

2種類の課題: 運動方向の弁別, 刺激の検出を各被験者は2 AFC法を用いて行った。刺激検出タスクでは2つのインターバルのうち刺激が含まれていたインターバルを答え、運動方向弁別タスクではガボール・マイクロパターンの運動方向(左右)を答える。

閾値コントラストを測定する3.2の実験では、恒常法を用いて得られた知覚確率を Weibull 関数で近似して 81.3% をそれぞれの閾値コントラ

トとし、3.3の実験では階段法を用いて閾値コントラストを求めた。階段法では1つのセッションは8回の折り返し後終了し、最後6回の折り返しの平均値をそのセッションの閾値コントラストとした。各条件で最低5セッション行われた。

2.4 被験者

被験者成人2名（TY：著者、心理物理学実験経験者で実験目的を知っている。MK：心理物理学実験未経験者で本実験の目的を知らない。）はFarnsworth-Munsell 100 Hue testにより色覚健常者であることを確認した。

3. 結果

3.1 搬送波成分の方位に対する選択性

まず、以降の実験で用いられる2つの刺激条件がそれぞれのメカニズムに適切であることを確認するために、Bakerら¹⁴⁾と同様に搬送波成分の方位に対する選択性について調べた。準線形メカニズムは搬送波成分の方位に対して選択性があるため、2フレーム間で搬送波成分の方位が一致していない場合運動検出能力が低下する。一方、非線形メカニズムは包絡波成分の方位に対して選択性を示すが、搬送波成分の方位については選択性はない（または、選択性は低い）。そのため、運動検出能力は2フレーム間での搬送波成分の方位変化にあまり依存しない^{2, 19, 20)}。図1

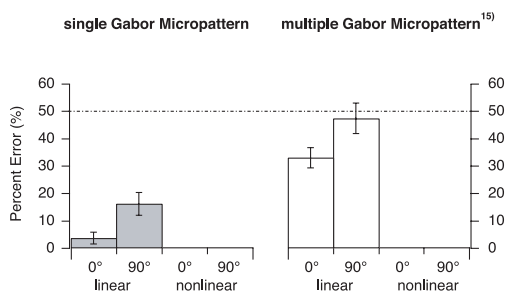


図1 搬送波成分の方位が変化した時の運動方向弁別能力。準線形（0°）：準線形条件で、搬送波の方向が2フレーム間で一致、準線形（90°）：搬送波成分の方位が2フレーム間で90°回転、それ以外は準線形条件、非線形（0°）：非線形条件で、搬送波成分の方位が2フレーム間で一致、非線形（90°）：搬送波の方向が2フレーム間で90°回転、それ以外は非線形条件。各条件で80試行以上行われた。誤差棒は2項分布の標準誤差を表す。

は準線形(Linear)および非線形条件(Nonlinear)で2フレーム間の搬送波成分を90°回転させたときの運動方向弁別の誤答率を示している。刺激のコントラストは準線形、非線形条件で測定された刺激検出閾値コントラストの15.9 dB上、また搬送波成分の方位がフレーム間で異なる以外は2.2で記述した刺激パラメータと同一である。準線形条件では搬送波成分の方位を90°回転させる(linear (90°))と誤等率が上昇するのに対して、非線形条件では搬送波成分の回転の有無に関わらず、誤答率は0である*。これは搬送波成分の方位に選択性をもつ運動メカニズムと搬送波成分の方位にはあまり感度をもっていない運動メカニズムが分離されたことを示唆している。図1の右側のグラフが示すように同様の傾向がYoshizawaら¹⁵⁾の研究において報告されている。しかし、彼等の結果では搬送波の方位が90°回転した時の誤等率が約50%である。この定量的な違いについては考察で述べる。

3.2 輝度ノイズのマスクング効果

図2は刺激の運動方向の弁別(●)と刺激の検出(○)の閾値コントラストを輝度ノイズのコントラストの関数として示している。左端のデータ点は輝度ノイズがないときのそれぞれの閾値コントラストである。誤差棒はbootstrap法²¹⁾を用いて500サンプルの知覚確率関数より計算された推定標準偏差である。

被験者TYの等輝度色刺激の場合(Color)、準線形条件(Linear)では輝度ノイズのコントラストの増加とともに運動方向弁別の閾値コントラストは上昇している。これに対し、刺激検出の閾値は輝度ノイズのコントラストに関わらず一定である。一方、非線形条件(Nonlinear)では両閾値コントラストは輝度ノイズのコントラストに関わらず一定であり、かつ両者は同一であることがわかる。同様の結果が、被験者MKの場合にも見られる。

* 非線形条件での誤答率が搬送波成分の方位にかかわらず0%であるのがfloor効果でないことはYoshizawaら¹⁵⁾の同様の実験(図2, 3)において刺激の空間変位量に対する誤答率関数が搬送波成分の方位にかかわらず同一であることから示唆される。

輝度刺激の場合 (Luminance), 被験者TYの準線形条件では運動方向弁別と刺激検出の閾値コントラストは輝度ノイズのコントラストの増加とともに単調増加している。また, 非線形条件でも, 両閾値コントラストは輝度ノイズのコントラストの増加とともに単調増加し, かつ両者は一定の差で増加していることがわかる。被験者MKの結果も同様な傾向があることがわかる。これら4刺激条件の結果を比較すると, 準線形条件の等輝度色刺激の場合, 運動方向弁別の閾値コントラストと刺激検出の閾値コントラストの差が他の場合より大きく, また, その差が輝度ノイズのコントラストの増加に伴って増加する傾向がある。

上記の結果は基本的に Yoshizawa ら¹⁵⁾ の報告と同様であるが, 定量的な差については考察において後述する。

3.3 等輝度色ノイズのマスキング効果

図3は準線形, 非線形条件での輝度または等輝度色刺激に対する等輝度色ノイズのマスキング

効果を示している。図2と同様, 運動方向の弁別と刺激検出の閾値コントラストを等輝度色ノイズのコントラストの関数としてプロットした。

被験者TYの場合, 準線形条件の等輝度色刺激における刺激検出の閾値コントラストは等輝度色ノイズのコントラストの増加に伴い単調に増加している。また, 運動方向弁別の閾値コントラストも等輝度色ノイズのコントラストの増加に伴い単調に増加しているが, その増加率は刺激検出の閾値コントラストの場合より低い。一方, 非線形条件の等輝度色刺激については両閾値コントラストは共に等輝度色ノイズのコントラストの増加に伴い単調に増加し, また, 両者は極めてよく一致している。準線形条件の輝度刺激に対する運動方向の弁別および刺激検出の閾値コントラストは等輝度色ノイズのコントラストにかかわらずほぼ一定であり, 両者にはほとんど差がない。同様の結果が非線形条件の輝度刺激を用いた場合にも得られた。

被験者MKの結果にも同様の傾向が現れてい

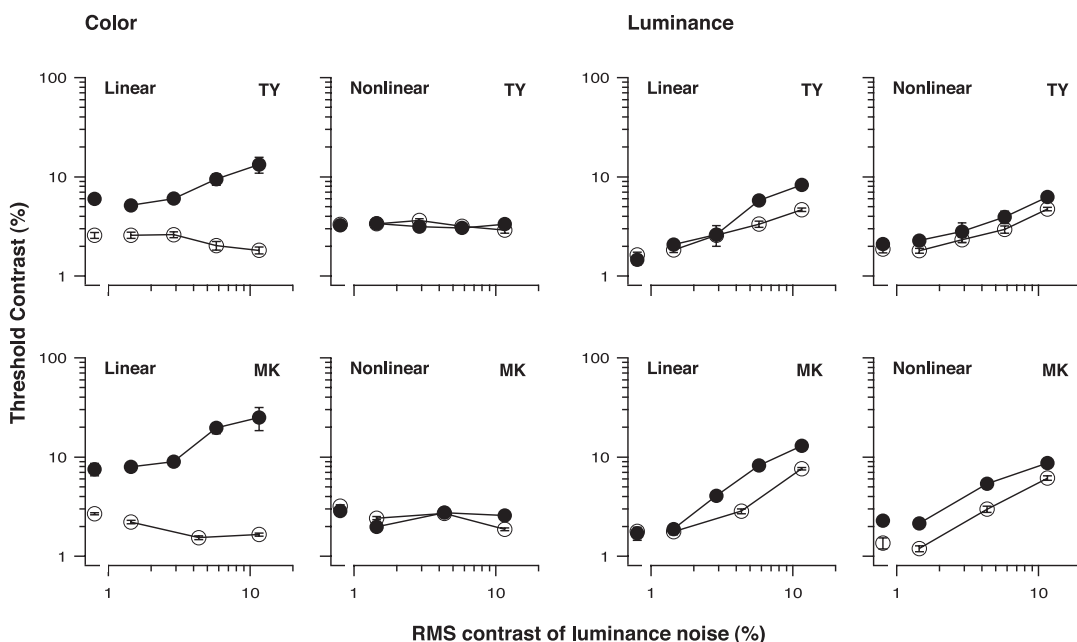


図2 刺激検出および運動方向弁別に対する輝度ノイズの影響. 縦軸は閾値コントラスト, 横軸は輝度ノイズのRMSコントラスト. ●, ○はそれぞれ運動方向弁別および刺激検出閾値. 誤差棒はbootstrap法(500サンプル)により計算された標準誤差. 各グラフ中の左側の独立したデータ点は輝度ノイズが加えられていない時の閾値. 上段の4グラフは被験者TY, 下段は被験者MKの結果. 等輝度色刺激 (color) と輝度刺激 (luminance) に対する準線形条件, 非線形条件下での結果はそれぞれ, 各グラフ中に linear, nonlinear とラベルされている。

る。ただし、準線形条件の等輝度色刺激の場合、運動方向弁別の閾値コントラストは等輝度色ノイズのコントラストが最大のとき以外ではほとんど一定であるのに対し、刺激検出の閾値コントラストは等輝度色ノイズのコントラストの増加に伴い、単調に増加している。輝度刺激の場合、準線形および非線形の両条件において運動方向の弁別および刺激検出の閾値コントラストは等輝度色ノイズのコントラストにかかわらずほぼ一定であり、両者はほとんど差がない。

本実験の結果は定性的にはYoshizawaらの先行研究¹⁵⁾の結果と一致しており、等輝度色ノイズは非線形等輝度色運動の検出に大きく影響していることがわかる。両者の定量的な違いについては次の考察で述べる。

4. 考察

本論文の実験結果は以下の2点で複数のガボールマイクロパターンを用いたYoshizawaらの先行研究¹⁵⁾における実験結果と一致している。

第一に準線形条件下の色運動知覚は輝度ノイズにより抑制されるが、等輝度色ノイズには影響されない。ところが刺激の検出閾値はその逆で、等輝度色ノイズのコントラストの増加とともに上昇するが、輝度ノイズには影響されない。このことは、準線形条件下の色運動の信号は主に輝度チャンネルから出力されることを示唆している。

第二に非線形条件下の色運動の方向弁別閾値および刺激検出閾値は等輝度色ノイズのコントラストの増加に伴って上昇するが、輝度ノイズには影響されない。すなわち、非線形条件下の色運動知覚は主に色チャンネルからの信号により生成されることを示唆している。

4.1. 刺激検出と運動方向弁別の閾値の差

刺激検出と運動方向弁別の閾値を測定した先行研究^{10,11,22-26)}では、輝度刺激の場合両者の閾値に差はない。等輝度色刺激の場合では約2倍運動方向弁別の閾値が大きいことが報告されている。ただし、Lindsey and Teller²²⁾とMullen and

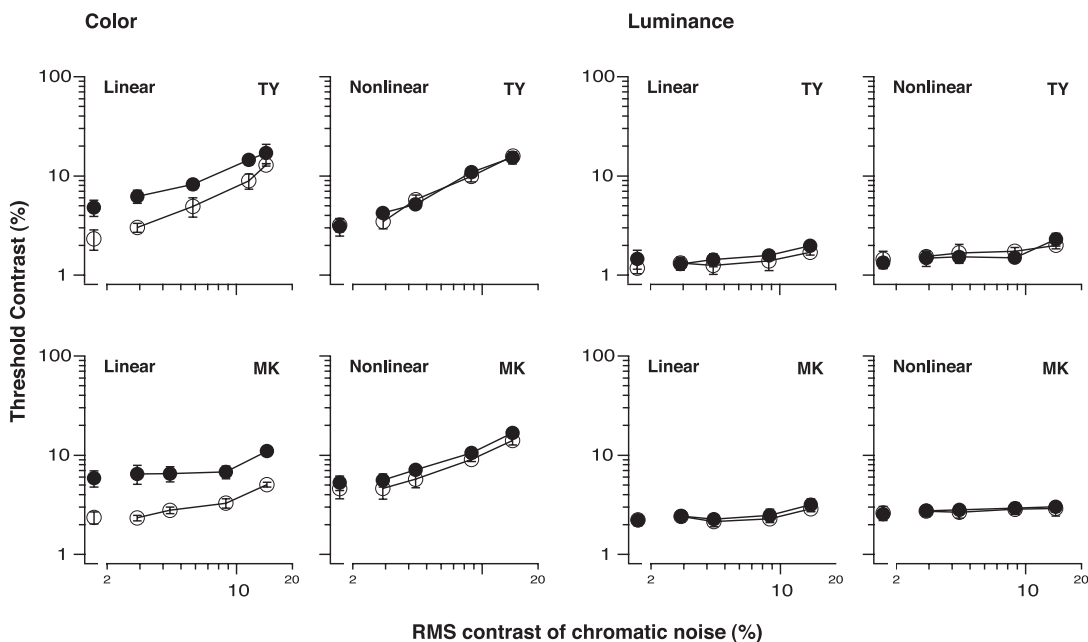


図3 刺激検出および運動方向弁別に対する等輝度色ノイズの影響。縦軸は閾値コントラスト、横軸は等輝度色ノイズのRMSコントラスト。●、○はそれぞれ運動方向弁別および刺激検出閾値。誤差棒は標準誤差。各グラフ中の左側の独立したデータ点は輝度ノイズが加えられていない時の閾値。上段の4グラフは被験者TY、下段は被験者MKの結果。等輝度色刺激 (color) と輝度刺激 (luminance) に対する準線形条件、非線形条件下での結果はそれぞれ、各グラフ中に linear, nonlinear とラベルされている。

Boulton¹⁰⁾ は閾値の差は刺激が周辺視野に呈示された場合には大きくなること報告している。ただし、これらの先行研究ではいずれも刺激に輝度または等輝度色ノイズを加えていない。本研究においてノイズが加えられていない場合の結果は先行研究とよく一致している。

ここでは、運動方向弁別と刺激検出の閾値コントラストの比（以後、閾値比と呼ぶ。）をノイズコントラストの関数として表し、各刺激条件に対するノイズのマスクング効果の違いについて検討する。

図4は実験3.2で得られた刺激検出と運動方向弁別の閾値から閾値比を計算し、輝度ノイズコントラストの関数として示したものである。被験者TYの場合（図4左のグラフ）、準線形、非線形両条件において輝度刺激（それぞれ、図4中○、□）に輝度ノイズが加えられた時の閾値比はノイズコントラストに依存せず、約1である。すなわち、輝度刺激の運動方向弁別および刺激検出に対する輝度ノイズのマスクング効果はほぼ同様であり、刺激検出と運動検出が同じメカニズムで行われていることを示唆している。また、非線形条件の等輝度色刺激（図4中■）の場合も輝度ノイズのコントラストにかかわらず一

定であり、約1である。ただし、図2を考慮すると非線形条件の等輝度色刺激に対する刺激検出と運動検出には輝度ノイズの影響はないことがわかる。一方、準線形条件の等輝度色刺激（図4中●）の場合は輝度ノイズのコントラストの増加に伴い、閾値比が約2.5から7.5へと上昇している。さらに、図2で等輝度色刺激の検出閾値が輝度ノイズのコントラストにかかわらず一定であることを考慮すると、輝度ノイズは準線形条件等輝度色刺激の運動検出だけに影響を与えることが示唆される。

被験者MKの場合も同様な傾向を示している。ただし、準線形条件の等輝度色刺激に対する閾値比は輝度ノイズのコントラストの増加に伴い、約4から15へと上昇しており、運動方向弁別メカニズムと刺激検出メカニズムに対する輝度ノイズの影響の差は被験者TYより大きい。

さらに、上記の閾値比が刺激条件の違いにより、有意な差があるかを反復測定分散分析で調べた。その結果、両被験者ともに主効果（被験者TY:F(3,12)=7.159, P<0.01, 被験者MK:F(3,9)=7.462, P<0.01）が確認された。また、さらに有意水準5%でTukey-Kramer検定を行った結果、準線形条件の等輝度色刺激の場合の閾値比はそれ以外の閾値比に対して有意な差があった。

図5は実験3.3で得られた結果から図4と同様に閾値比を計算したものである。被験者MKの場合（図5中右側のグラフ）、輝度刺激（図5中○、□）および非線形条件の等輝度色刺激（図5中■）に対する閾値比は等輝度色ノイズのコントラストにかかわらず、約1で一定である。図3を考慮すると等輝度色ノイズは輝度刺激の検出および運動メカニズムに対してマスクング効果がないことが示唆される。一方、準線形条件の等輝度色刺激（図5中●）の場合、等輝度色ノイズのコントラストが増加するのに伴い、閾値比が減少していることがわかる。同様の傾向が被験者TYの場合にもみられるが、準線形条件の等輝度色刺激の閾値比は約2前後で被験者MKより小さい。また、非線形条件の等輝度色刺激の閾値比は等輝度色ノイズのコントラストが増加するの

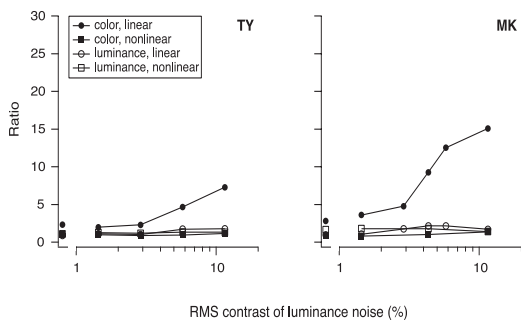


図4 刺激検出閾値に対する運動方向弁別閾値の比。縦軸は刺激検出閾値に対する運動方向弁別閾値の比。横軸は輝度ノイズのRMSコントラスト。●、■はそれぞれ等輝度色刺激の準線形条件（color, linear）、非線形条件（color, nonlinear）の結果。○、□それぞれ輝度刺激の準線形条件（luminance, linear）、非線形条件（luminance, nonlinear）の結果。左右各グラフは被験者TY、MKの結果。各グラフ中の左側の独立したデータ点は輝度ノイズが加えられていない時の閾値比。

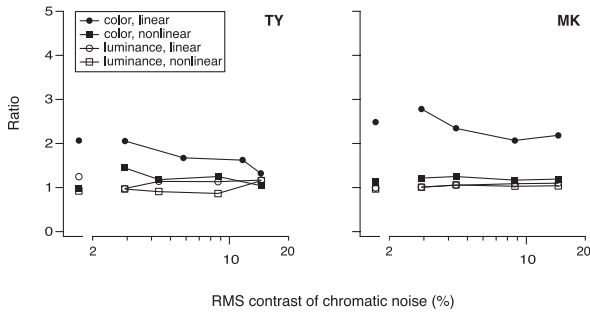


図5 刺激検出閾値に対する運動方向弁別閾値の比。縦軸は刺激検出閾値に対する運動方向弁別閾値の比。横軸は等輝度色ノイズのRMSコントラスト。●, ■はそれぞれ等輝度色刺激の準線形条件 (color, linear), 非線形条件 (color, nonlinear) の結果。○, □それぞれ輝度刺激の準線形条件 (luminance, linear), 非線形条件 (luminance, nonlinear) の結果。左右各グラフは被験者TY, MKの結果。各グラフ中の左側の独立したデータ点は等輝度色ノイズが加えられていない時の閾値比。

に伴い、少々減少しているようにも見える。そこで、図4の場合と同様、反復測定分散分析を行った。その結果、主効果(閾値比が刺激条件の違いにより異なるか)が被験者TYの場合 $F(3,12) = 12.863, P < 0.001$, 被験者MKの場合 $F(3,12) = 92.942, P < 0.0001$ で確認された。さらに、有意水準5%でTukey-Kramer検定を行った結果、両被験者ともに準線形条件の等輝度色刺激の場合の閾値比はそれ以外の閾値比に対して有意な差があった。

閾値比に対する輝度または等輝度色ノイズの影響は等輝度色刺激の準線形条件の場合、顕著に他の場合と異なっており、その傾向はYoshizawaら¹⁵⁾の結果と定性的には同様である。ただし、定量的には異なり、Yoshizawaら¹⁵⁾はより大きな閾値比を報告している。

4.2. GMKの有効性

上述したように、輝度刺激に対する輝度ノイズの影響(図2)および等輝度色刺激に対する等輝度色ノイズの影響(図3)は本研究の結果の方がYoshizawaら¹⁵⁾の結果より小さい。また、準線形条件の等輝度色刺激の閾値比に対する輝度および等輝度色ノイズの影響はYoshizawaら¹⁵⁾の結果の方がより顕著である。このことは、単一のガボール・マイクロパターンを用いた場合よ

り複数の場合の方が準線形および非線形色運動メカニズムの分離が顕著であることを示唆している。

図6は先行研究^{5,14,15)}と本研究の結果から得られる準線形および非線形色運動メカニズムの時空間特性を定性的に示したものである*。中段はSOA, 空間変位量(displacement)およびガボール・マイクロパターンの密度(density)の3つの特徴量に対する各色運動メカニズムの応答範囲を表し、球の中心がそれぞれのメカニズムに最適な値である。上段の2図, 下段の図はそれら3つの特徴量のうち2つの特徴量に対する各色運動メカニズムの応答範囲を表し、円の中心がそれぞれのメカニズムに最適な値である。また、各色運動メカニズムの応答範囲がオーバーラップする範囲(各図において2つの円が重なる範囲)は灰色で示されている。

図6上段左図に示したようにSOAおよび空間変位量の特徴空間で準線形, 非線形色運動メカニズムの時空間特性がある部分でオーバーラップしている可能性があり、色運動メカニズムに関する先行研究間の結果が一致していない要因の一つであると考えられる。準線形, 非線形色運動メカニズムの上記3次元特徴空間上における時空間応答特性の系統的解明は今後の課題である。

色運動に関する多くの先行研究では、正弦波グレーティングが刺激として中心視野に呈示される実験が行われており、単一のガボール・マイクロパターンが呈示される本研究と刺激の空間的構図はよく似ている。Cropper and Derrington¹²⁾はこのような刺激布置の場合(特に刺激呈示時間が長い場合)、運動情報以外の情報(例えば、位置変化の情報や眼球運動の遠心性コピー)により運動方向弁別が行われる可能性を指摘している。本研究の閾値比がYoshizawaら¹⁵⁾のより小さいという結果は、そのような情報が運動方向弁別タスクに寄与し、より低い閾値が得られ

* 特徴空間上における各メカニズムの応答範囲等は定量的に表されているわけではない。

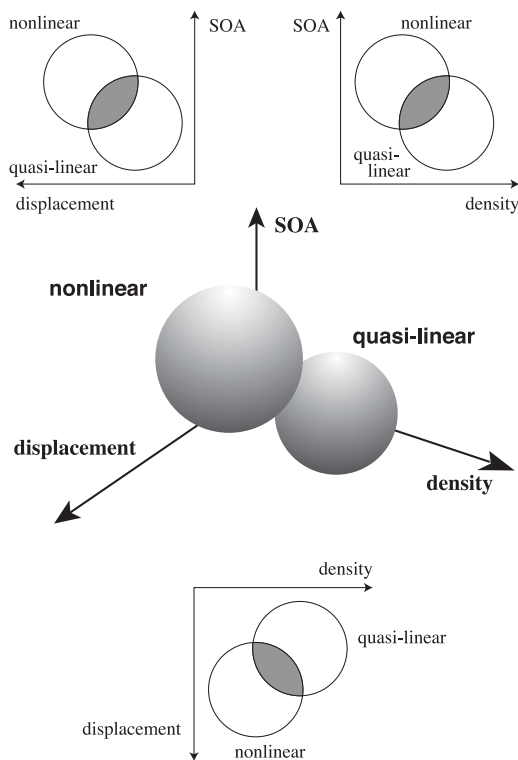


図6 準線形、非線形運動メカニズムの時空間応答特性。上段左図：SOAと空間変位量（displacement）特徴空間上での準線形（quasi-linear）、非線形（nonlinear）運動メカニズムの応答範囲。円の中心が各運動メカニズムの最適条件。2つの円が重なる灰色の領域は両運動メカニズムが応答する条件。上段右図：SOAとガボール・パターン密度（density）特徴空間上での準線形、非線形運動メカニズムの応答範囲。中段：SOAと空間変位量、およびガボール・パターン密度特徴空間上での準線形、非線形運動メカニズムの応答範囲。球の中心が各運動メカニズムの最適条件。下段：空間変位量とガボール・パターン密度特徴空間上での準線形、非線形運動メカニズムの応答範囲。

たことも原因の一つであると考えられる。ただし、運動情報以外の情報が運動検出に及ぼす影響は準線形及び非線形の両条件において存在しており、これにより準線形等輝度色運動の検出に及ぼすノイズのマスクング効果と非線形等輝度色運動検出に及ぼすマスクング効果の違いを説明することは困難である。

Boulton and Baker²⁷⁾ は輝度ガボール・マイクロパターンの密度（ガボール・マイクロパターンの数）の関数として D_{max} を測定し、その密度がある一定以上になると D_{max} が大きく変化するこ

とから、ガボール・マイクロパターンの密度を変えることにより2つの輝度運動メカニズムを分離することができることを報告している。ただし、彼等のGMKの時間パラメータは本研究の準線形条件と同一である。また、彼等はガボール・マイクロパターンの密度と数の関係についても検討し、パターンが粗に分布している時には D_{max} がガボール・マイクロパターンの数に依存することを報告している。

本研究ではガボール・マイクロパターンの数について検討したが、大きさや搬送波の空間周波数に関する検討は今後の課題である。

4.3 準線形、非線形運動メカニズム

本研究および先行研究¹⁴⁻¹⁶⁾の結果より、色運動を検出するメカニズムについて考察する。非線形色運動は等輝度色ノイズに運動検出及び刺激検出が抑制され、輝度ノイズには影響されないことから反対色チャンネルによって処理されていると考えられる。ただし、一つの子線形メカニズムが反対色チャンネルと輝度チャンネルの両方から信号を受けているのか、または非線形色運動メカニズムが非線形輝度運動メカニズムとは独立に存在しているのかは明らかではない。

この点について、Bakerら¹⁴⁾は2フレームの仮現運動刺激として第1フレームに等輝度のガボール・マイクロパターン、第2フレームに輝度のガボール・マイクロパターンを準線形及び非線形条件で呈示したところ、準線形条件では運動検出が困難であるのに対し、非線形条件の場合には運動が検出されることを報告している。このことは非線形運動検出のどこかの処理過程で反対色チャンネルおよび輝度チャンネル経由の信号が統合されていること示唆している。

一方、準線形色運動の検出は輝度ノイズに抑制されるのに対し、刺激自身の検出に輝度ノイズは影響しない。逆に等輝度色ノイズは準線形色運動に対してマスクング効果がないのに対し、刺激の検出には影響を及ぼす。このことから、準線形色運動刺激の処理メカニズムについては以下の2つの説明が可能である。準線形色運動刺激のパターン検出は反対色チャンネルか

らの信号が優位に利用され閾値コントラストが決められ、準線形色運動検出は主に輝度チャンネルからの信号により検出されている。この信号は等輝度色刺激が十分等輝度でないことや色収差により、刺激自身に微少輝度成分が残留しているのではない。もし、刺激自身に輝度成分が残留しているのであれば、等輝度色刺激の検出にも輝度ノイズは影響を及ぼすであろう。このことから、この輝度信号は視覚システムにおいて内的に生成される動的なものと考えられる^{28, 29)}。Stromeyer, Kronauer, Ryu, Chaparro and Eskew²⁸⁾はL-, またはM-錐体由来の信号間に存在する位相差が生成する輝度成分が輝度チャンネルへ入力することにより準線形色運動を検出することが示唆されると報告している。また、その位相差は刺激条件により異なり²⁹⁾、輝度チャンネルにおいて大きい反対色チャンネルにおいてはほとんど生じない³⁰⁾ことが報告されている。

もう一つは刺激検出は前者同様、主に反対色チャンネルからの信号により決められ、準線形色運動の検出信号を生成するには輝度、及び等輝度色刺激の両方に応答するメカニズムが関与しているという考えである。Johnson, Hawken and Shapley³¹⁾はマカクザルのV1に等輝度色刺激に応答する細胞があることを報告している。このような細胞が準線形色運動の検出に部分的に寄与している可能性がある。さらに、Cavanagh and Anstis¹¹⁾は位相差、または網膜またはLGNにおけるmagnocellular細胞間の等輝度が異なることにより生じる微少輝度成分によって等輝度色運動検出の結果を十分説明することは困難であると報告しており、内的に生成される輝度成分意外の信号も準線形色運動の検出に寄与していると考えられる。ただし、同時に上記の内的に生成される輝度信号による輝度チャンネルへの寄与も考えられる。

5. 結論

単一のガボール・マイクロパターンが呈示されたとき輝度または等輝度色ノイズの運動方向弁別閾値と刺激検出閾値に及ぼす影響は複数の

ガボール・マイクロパターンが呈示された場合¹⁵⁾と定性的に似ており、準線形等輝度色運動は主に輝度チャンネルからの信号によって、また非線形等輝度色運動は反対色チャンネルからの信号により検出されていることを示した。このことは、GMKの時空間パラメータのうち1つが最適でなくとも線形および非線形運動知覚の分離が可能であり、また、線形および非線形色運動知覚メカニズムの時空間特性はある意味で部分的にオーバーラップしていることを示唆している。さらに本研究結果は複数のガボール・マイクロパターンにより一群をなす刺激パターンが運動方向弁別タスクにより有効であることを示唆している。

文 献

- 1) 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.
- 2) C. Chubb and G. Sperling: Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 1986-2006, 1988.
- 3) A. T. Smith and R. J. Snowden: Visual Detection of Motion. Academic Press, San Diego, 1994.
- 4) P. Cavanagh and G. Mather: Motion: the long and short of it. *Spatial Vision*, **4**, 103-129, 1989.
- 5) J. C. Boulton and C. L. Baker, Jr.: Psychophysical evidence for both a "quasi-linear" and a "nonlinear" mechanism for the detection of motion. *T. B. Lawton (Ed): Proceedings of SPIE, Computational vision based on neurobiology*. 2054, 124-133, 1994.
- 6) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: Psychological evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, **7**, 3416-3468, 1987.
- 7) V. S. Ramachandran and R. L. Gregory: Does colour provide an input to human motion perception? *Nature*, **275**, 55-56, 1978.

- 8) P. Cavanagh, C. W. Tyler and O. E. Favreau: Perceived velocity of moving chromatic gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, **1**, 893-899, 1984.
- 9) T. Troscianko and M. Fahle: Why do isoluminant stimuli appear slower? *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 871-880, 1988.
- 10) K. T. Mullen and J. C. Boulton: Absence of smooth motion perception in color vision. *Vision Research*, **32**, 483-488, 1992.
- 11) P. Cavanagh and S. M. Anstis: The contribution of color to motion in normal and colordeficient observers. *Vision Research*, **31**, 2109-2148, 1991.
- 12) S. J. Cropper and A. M. Derrington: Rapid colourspecific detection of motion in human vision. *Nature*, **379**, 72-74, 1996.
- 13) Z. Lu, L. A. Lesmes and G. Sperling: The mechanism of isoluminant chromatic motion perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **96**, 8289-8294, 1999.
- 14) C. L. Baker, Jr., J. C. Boulton and K. T. Mullen: A nonlinear chromatic motion mechanism. *Vision Research*, **38**, 291-302, 1998.
- 15) T. Yoshizawa, K. T. Mullen and C. L. Baker, Jr.: Absence of a linear chromatic motion mechanism in human vision. *Vision Research*, **40**, 1993-2010, 2000.
- 16) T. Yoshizawa, K. T. Mullen and C. L. Baker, Jr.: The motion of red-green chromatic gratings is mediated by a luminance-based mechanism. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **41** (No.4), S525, 2000.
- 17) T. Yoshizawa and M. J. Hawken: Second-order chromatic motion is not influenced by luminance masking. *First Asian Conference on Vision*, **24**, 2001.
- 18) A. Bradley, X. Zhang and L. N. Thibos: Failures of isoluminance caused by ocular chromatic aberration. *Applied Optics*, **31**, 2109-2148, 1992.
- 19) I. Mareschal and C. L. Baker, Jr.: Cortical processing of second-order motion. *Visual Neuroscience*, **16**, 527-540, 1999.
- 20) L. P. O'Keefe and J. A. Movshon: Processing of first- and second-order motion signals by neurons in area MT of the macaque monkey. *Visual Neuroscience*, **15**, 305-317, 1998
- 21) B. Efron and R. J. Tibshirani: An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall, 1993.
- 22) D. T. Lindsey and D. Y. Teller: Motion at isoluminance: Discrimination/ detection ratios for moving isoluminant gratings. *Vision Research*, **30**, 1751-1761, 1990.
- 23) J. Palmer, L. A. Mobley and D. Y. Teller: Motion at isoluminance: discrimination/detection ratios and the summation of luminance and chromatic signals. *Journal of the Optical Society of America A*, **10**, 1353-1362, 1993.
- 24) A. M. Derrington and G. B. Henning: Detecting and discriminating the direction of motion of luminance and colour gratings. *Vision Research*, **33**, 799-811, 1993.
- 25) A. B. Metha, A. J. Vingrys and D. R. Badcock: Detection and direction discrimination thresholds for moving stimuli: the effects of color, luminance and eccentricity. *Journal of the Optical Society of America A*, **11**, 1697-1709, 1994.
- 26) A. B. Metha and K. T. Mullen: Failure of direction discrimination at detection threshold for both fast and slow chromatic motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **15**, 2945-2950, 1998.
- 27) J. C. Boulton and C. L. Baker, Jr.: Different parameters control motion perception above and below a critical density. *Vision Research*, **33**, 1803-1811, 1993.
- 28) C. F. Stromeyer III, R. E. Kronauer, A. Ryu, A. Chaparro and R. T. Eskew, Jr.: Contributions of human long-wave and middle-wave cones to motion detection. *Journal of Physiology*, **485**, 221-243, 1995.
- 29) C. F. Stromeyer III, A. Chaparro, A. S. Tolia and R. E. Kronauer: Colour adaptation modifies the

- longwave versus middle-wave cone weights and temporal phases in human luminance (but not red-green) mechanism. *Journal of Physiology*, **499**, 227-254, 1997.
- 30) V. C. Smith, B. B. Lee, J. Pokorny, P. R. Martin and A. Valberg: Responses of macaque ganglion cells to the relative phase of heterochromatically modulated lights. *Journal of Physiology*, **458**, 191-221, 1992.
- 31) E. N. Johnson, M. J. Hawken and R. Shapley: The spatial transformation of color in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nature Neuroscience*, **4**, 409-416, 2001.