■ **講演要旨**（VISION Vol. 22, No. 4, 217–221, 2010）

コントラスト定義の空間オフセットの残効はキャリアの方位に依存する

小林 憲史・村上 郁也

東京大学 大学院総合文化研究科
〒153–8902 東京都目黒区駒場 3–8–1

1. はじめに

視覚情報のうちコントラスト変調のような二次属性は，輝度変調のような一次属性とは少なくとも部分的には異なる機構で処理されていると考えられるが，その情報処理機構として Filter-Rectify-Filter (FRF) と呼ばれるモデルが提案されている[1–3]．コントラスト変調の検出に限れば，この機構は 1) 輝度変調を検出する第一段階フィルタ，2) 第一段階フィルタの出力からコントラストの空間分布を得るような非線形処理（e.g. 全波整流），3) コントラスト変調を検出する第二段階フィルタ という三段階で構成される．

このような FRF 機構の第一段階フィルタおよび第二段階フィルタはどちらも方位に選択的であると考えられているが，結合したフィルタ同士の方位の間にどのような関係性があるかはいまだ明らかではない．これまで提案されている主な仮説を**図 1** に示した．一部の研究はフィルタ間の方位選択的な結合を主張しており，とくに第二段階フィルタが自らと同じ方位[4]（図 1a）もしくは垂直な方位[5]（図 1b）に選択的な第一段階フィルタのみから強い入力を受けている，

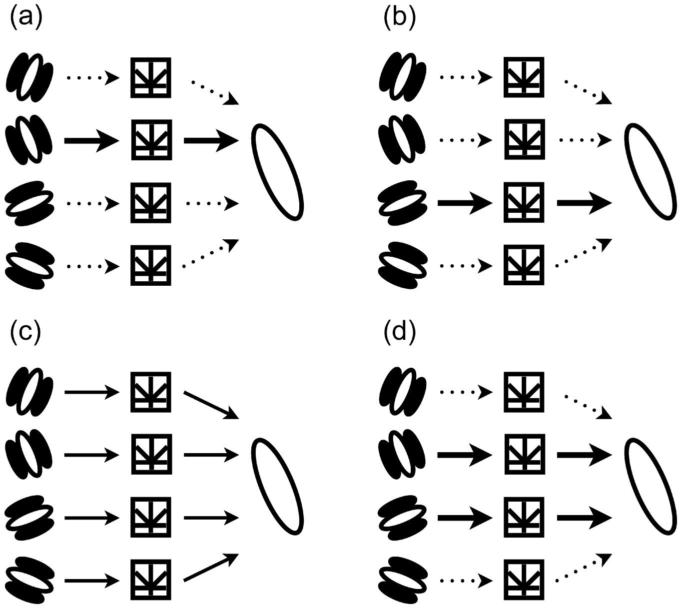

図 1　FRF 機構における方位選択性のモデル．

2010 年冬季大会．ベストプレゼンテーション賞．

という可能性が提案されている．他方，フィルタ間の結合は完全に等方的であり，第二段階フィルタはあらゆる方位のキャリアの情報を統合しているという主張もある[6–8]（図 1c）．さらに，平行および垂直なフィルタ同士の結合がどちらも強いという機構も考えられる[9]（図 1d）．

これらの仮説を検証するため，本研究ではガボール・パッチのペアにおける位置ずれの残効がキャリアの方位にどのように依存するかを調べた．上下のパッチの間に水平方向の位置ずれがあるペア群をしばらく眺めると，この位置ずれに対する順応が生じ，結果として物理的には左右にずれていないはずのパッチ・ペアが順応刺激とは逆向きにずれて見える．ガボール・パッチ間の位置ずれはコントラスト定義の属性であり，パッチ・ペア全体をカバーするような第二段階フィルタの傾きでコードされると考えられる．ここで順応刺激のキャリアの方位を変化させると，フィルタ間の結合の強さを反映して第二段階フィルタへの入力の強さが変化し，その結果順応効果に違いが生じると予想される．逆に言えば，キャリアの方位への残効量の依存性を調べることで，フィルタ間の方位結合性を明らかにすることができる．

2. 方　　法

被験者　正常な視力もしくは矯正視力をもつ 5 名（うち著者 1 名）が実験に参加した．

装置　実験は暗室内で行われ，刺激はすべて CRT モニタ（1200×800 pixels，リフレッシュレート 90 Hz）によって呈示された．観察距離は 85 cm であった．実験中被験者は頭部を顎台で固定され，右眼のみで刺激を観察した．

刺激　順応刺激・テスト刺激ともにガボール・パッチのペアによって構成された．キャリアの空間周波数 4 cpd，ガウス関数の標準偏差は 10.6 min であった．平均輝度は背景輝度と等しかった (45 cd/m^2)．実験中は画面の中心に固視点が呈示された．

順応刺激　固視点を中心とする 24×18 deg の領域内に，ガボール・パッチのペア 36 対を同時に呈示した（**図 2**）．各ペアの位置はランダムであり（ただし，異なるペアに属しているパッチ間の距離が同じペアのパッチより短くならないという制約条件を課した），100 ms ごとに変更された．各パッチの位相もランダムであり，各ペアの位置と同じタイミングで変更された．コントラストは 100% であった．

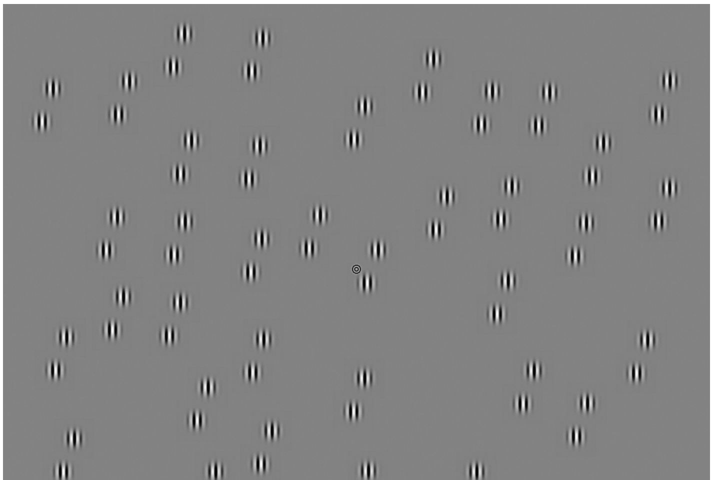

図 2　順応刺激のスナップショット．各ペアの位置および各パッチの方位はランダムに決定され，100 ms ごとに変更された．この図ではキャリアは垂直方位であるが，実際にはキャリアの方位は独立変数であった．

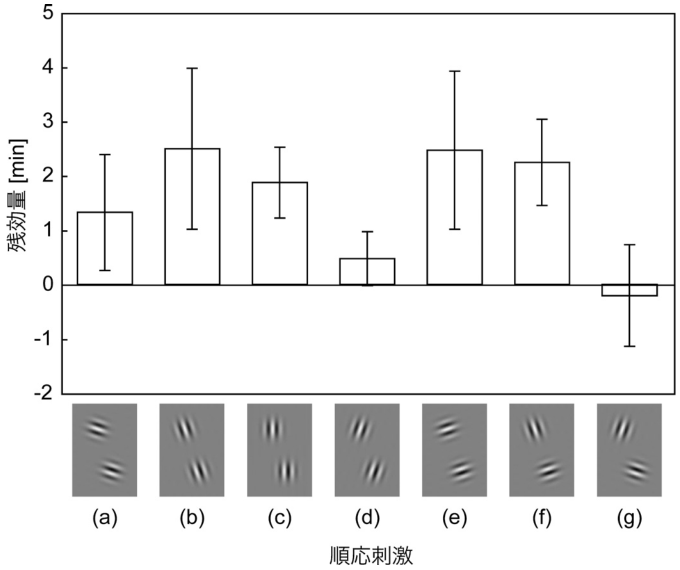

図 3　順応刺激におけるキャリアの方位の関数としての残効量．(a–g) 順応刺激のキャリア方位に関する 7 条件．エラーバーは 95%信頼区間．

各ペア内のパッチ間の水平方向の位置ずれについて，下のパッチが左にずれている場合と右にずれている場合との 2 条件を設けた．いずれの場合も水平距離は 25 min，垂直距離は 75 min であった．以下，この二つのパッチの中心点同士を結ぶ線の方位を「グローバルな方位」と呼ぶが，このグローバルな方位は垂直方位から 18.4° 傾いたものであった．

実験条件として，キャリアの方位に 7 条件を用意した（**図 3**a–g）．うち 5 条件では上下のパッチが同じ方位であり，キャリアは垂直方位から ±18.4° 傾いた方位（図 3b，d），±71.6° 傾いた方位（図 3a，e），もしくは垂直方位（図 3c）であった．残り 2 条件では上のパッチのキャリアは垂直方位から ±18.4° 傾いた方位，下のパッチのキャリアは ∓71.6° 傾いた方位であった（図 3f，g）．配置 b ではキャリアがグローバルな方位と平行，配置 e では垂直であり，配置 f では上下のパッチのキャリアがそれぞれグローバルな方位と平行および垂直であった．

テスト刺激　水平方位ガボール・パッチのペア 1 対を，固視点から左に 5 deg 離れた位置に呈示した（ただしモニタの縁などの情報が手がかりになるのを防ぐため，呈示位置を左右 8 min の範囲内で試行ごとにランダムに変化させた）．コントラストは 20–25% であった．

手続き　各試行は，順応刺激呈示（最初の試行で 90 s，それ以降は 6 s）・ITI（50 ms，固視点のみ呈示）・テスト刺激呈示（200 ms）・被験者による回答（固視点のみ呈示）の各フェイズで構成された．順応効果の消失を防ぐため，被験者が回答できる時間はテスト刺激が消えてから 1s 以内に制限され，その間に回答がなかった場合は直ちに次試行に移行し，当該試行はデータ処理から除外された．

PEST 法を用いて，テスト刺激のパッチ・ペアが縦に並んで見えるのに必要な物理的位置ずれを求めた．順応刺激の下のパッチが上のパッチに比べ右にずれていた場合と左にずれていた場合との物理的位置ずれの絶対値を平均し，残効量とした．

3.　予測・結果

上述した通り，FRF 機構におけるフィルタ間の方位結合性には主に 4 つの仮説が考えられるが，これらの仮説は結果について異なる予測を

生む．平行なフィルタ同士の接続が強ければ（図 1a），配置 b では残効が大きいが，e や f ではほぼ生じないだろう．垂直なフィルタ同士の接続が強ければ（図 1b），配置 e では残効が大きいが，b や f ではほぼ生じないだろう．もしフィルタ間の接続が等方的であれば（図 1c），残効量はキャリアの方位に依存しないだろう．第二段階フィルタが自らと平行および垂直な第一段階フィルタ両方から強い入力を受けているのであれば（図 1d），配置 b，e，f いずれについても大きな残効が得られるだろう．

図 3 に実際の残効量を，順応刺激におけるキャリアの方位の関数として示した．残効量はキャリアの方位に依存して変化した（$p<.01$）．この結果は等方的な仮説（図 1c）と矛盾する．また，配置 b，e，f いずれにも 0 より大きい残効が見られた（$p<.05$）が，これら 3 つの間に差は認められなかった（$p>.05$）．この結果は，方位選択的な二つの仮説（図 1a，b）のみでは（この二つを組み合わせても）説明できない．

したがって本実験の結果と矛盾しないのは，平行および垂直なフィルタ間の結合がどちらも強いという仮説（図 1d）だけである．逆に，以上の結果を説明するためにはこのような「平行・垂直」型の FRF 機構のみを仮定すれば十分であり，他のタイプの FRF 機構との組み合わせを考慮する必要はない．

4．考　　察

実験結果から，FRF 機構における第二段階フィルタは自らと同じ方位及び垂直な方位に選択的な第一段階フィルタ双方から強い入力を受けていることが明らかになった．この FRF 機構は互いに垂直な二つのキャリアにかかったコントラスト変調の情報を統合しているものの，やはり異方性を保持している．

4.1 過去の FRF モデルとの関連

互いに垂直な二つのキャリアを重ね合わせた刺激におけるコントラスト変調の検出感度は，各成分のコントラスト変調の和に依存して決定される．従来この事実は等方的な FRF 機構（図 1c）の存在の根拠とされてきた[6–8]が，本来「平行・垂直」型の FRF 機構（図 1d）によっても説明できるはずである．これまでの先行研究の多くは主に結合が方位選択的か否かを問題にしており，等方的な機構と「平行・垂直」型機構との比較は興味の対象になってこなかった（実際，二つのキャリア間の方位差を独立変数とした実験は行われておらず，どちらの仮説がより適切かは検討されていない）．本研究の結果は，これまで等方的な機構と考えられてきたものの正体が実は「平行・垂直」型機構であった可能性を指摘するものである．フィルタ間の結線数を減らすという経済的観点から言えば，むしろ後者が有利とも考えられる．

一方，フィルタ間の結合が方位選択的である（図 1a，b）と主張する先行研究も数多く存在する[4,5]．本実験の結果は，「平行・垂直」型機構を考えるだけで説明可能であるが，実際には方位選択的な FRF 機構も共存している可能性が高いだろう[8,10]．われわれの実験結果はたとえば，これらの FRF 機構（図 1a，b，d）が共存しており，それらの出力の最大値が残効の大きさを決定している，と考えることでも説明できる．

4.2 Contrast Facilitation

残効量が順応刺激のキャリアの方位に依存して変化する理由は，フィルタ間の結合の強さではなく第一段階フィルタの出力の変化に求められるかもしれない．ガボール・パッチの検出感度は周囲のガボール・パッチの方位に依存して変化することが知られている[11] (contrast facilitation) が，これに対応して第一段階フィルタの出力の変化が生じている可能性がある．

しかし三つの理由により，本実験の結果はこのような facilitation では説明できない．第一に，キャリアの方位が互いに垂直なガボール・パッチ同士の facilitation は平行なもの同士に比べあまり見られない[11]が，本実験では配置 f にて大きな残効を観察した．第二に，一般に contrast facilitation はキャリアの位相関係に大きく依存する[12]が，われわれの実験ではキャリアの位相に対し頑健な結果が得られた．第三に，本実験

の順応刺激のコントラストは非常に高く，検出感度付近で見られる現象である[12)] contrast facilitation の関与はないと考えられる．

4.3 課題

今後検討されるべき問題がいくつか残っている．たとえば，自然画像においては一次変調と二次変調が同じ方位をもつことが多い[13)]ため，垂直なフィルタ同士の結合が強くなければならない生態学的な理由は明らかではない．また，そもそも方位結合性が刺激の属性やサイズ，さらに課題によって変化する可能性もある．仮にこれが事実であるならば，様々な状況におけるFRF 機構の有り様に関する証拠を蓄積しその背後に潜むルールを明らかにすることが，二次属性の知覚研究の大きな目標の一つになるだろう．

文　献

1) N. Graham, J. Beck and A. Sutter: Nonlinear processes in spatial-frequency channel models of perceived texture segregation: Effects of sign and amount of contrast. *Vision Research*, **32**, 719–743, 1992.
2) M. S. Landy and J. R. Bergen: Texture segregation and orientation gradient. *Vision Research*, **31**, 679–691, 1991.
3) J. Malik and P. Perona: Preattentive texture discrimination with early vision mechanism. *Journal of the Optical Society of America A*, **7**, 923–932, 1990.
4) M. J. Morgan and S. Baldassi: How the human visual system encodes the orientation of a texture, and why it makes mistakes. *Current Biology*, **7**, 999–1002, 1997.
5) S. C. Dakin, C. B. Williams and R. F. Hess: The interaction of first- and second-order cues to orientation. *Vision Research*, **39**, 2867–2884, 1999.
6) A. J. Mussap: Orientation integration in detection and discrimination of contrast-modulated patterns. *Vision Research*, **41**, 295–311, 2001.
7) I. Motoyoshi and S. Nishida: Cross-orientation summation in texture segregation. *Vision Research*, **44**, 2567–2576, 2004.
8) N. Prins: Texture modulation detection by probability summation among orientation-selective and isotropic mechanisms. *Vision Research*, **48**, 2751–2766, 2008.
9) D. R. Keeble and S. Nishida: Micropattern orientation and spatial localization. *Vision Research*, **41**, 3719–3733, 2001.
10) I. Motoyoshi and F. A. A. Kingdom: Differential roles of contrast polarity reveal two streams of second-order visual processing. *Vision Research*, **47**, 2047–2054, 2007.
11) U. Polat and D. Sagi: Lateral interactions between spatial channels: Suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments. *Vision Research*, **33**, 993–999, 1993.
12) C. B. Williams and R. F. Hess: Relationship between facilitation at threshold and suprathreshold contour integration. *Journal of the Optical Society of America A,* **15**, 2046–2051, 1998.
13) A. P. Johnson and C. L. Baker Jr.: First- and second-order information in natural images: A filter-based approach to image statistics. *Journal of the Optical Society of America A*, **21**, 913–925, 2004.