

運動視処理における時間・空間周波数チャンネル間の 非線形相互作用解析

林 隆介*・横山 裕樹**・渡部 修***・西田 眞也****

* 産業技術総合研究所 人間情報研究部門 システム脳科学研究グループ

〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2-1

** 大阪大学 大学院工学研究科

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1

*** 室蘭工業大学 大学院工学研究科

〒050-0071 北海道室蘭市水元町27-1

**** NTTコミュニケーション科学基礎研究所

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮3-1

r-hayashi@aist.go.jp

1. はじめに

本解説記事の共同著者である渡部（2015年6月急逝）は、2011年の視覚学会冬季大会において、強い非線形性が予想される知覚判断の特性を、実験データの統計量から推定する手法を発表した。これは、線形モデルのパラメータ推定に有効な、逆相関法やspike-triggered average法を、非線形モデルに拡張した手法で、多項式近似（Volterra級数展開）した非線形モデルのパラメータ（カーネル）が、実験によって得られる入出力データ（多様にサンプリングした視覚入力とそれに対する被験者の応答を集めたデータ）の統計量（モーメント）から推定できる。同手法は、極めて汎用性が高く、高次のカーネル（要因間の2次以上の交互作用）が1次のカーネル推定に及ぼすバイアスを除外できるほか、逆相関法などの従来法と違い、実験に用いる刺激分布が不均一（円形対称でない）であっても、分布中心がゼロでなくとも、推定バイアスを補正できる利点がある。渡部は、推定手法の理論的な導出とシミュレーションによる検証だけでなく、心理物理実験を行い、実データに対する適用例を示した。心理物理実験で扱う視覚情報処理の多くは、線形モデルで記述しきれないため、今後の解明に極めて有効な手法

であると期待される。

一方、林らは、異なる時間・空間周波数成分をもつ正弦波縞同士がどのような重みづけで統合されて運動方向判断に影響するか、逆相関法を用いて調べる研究を行った。しかし、そのような手法で統合重みを推定しても、推定時と異なる周波数構造をもつ視覚刺激に対しては、運動方向判断の応答をうまく予測できない問題が生じていた(Hayashi et al., 2010)。林らに問題解決の協力を請われた渡部は、林らと類似の条件下で心理物理実験を行ったうえで、新しい解析手法を用いて、2次の非線形性を含めた、時間・空間周波数チャンネル間の交互作用を調べる研究に取り組んだ。

本解説記事は、ご遺族の許可を得て、渡部が生前残した解析データをもとに、林らがあらたな解析を加えて記述したものである。渡部の解析法を世に知らしめ、その有効性を示す資料として役立つという考えに立って、解説としてここに報告する。

2. 実 験

異なる時間・空間周波数成分をもつ、さまざまな正弦波縞が重なって表示されたとき、それぞれの周波数成分がどのような重みづけで、運動方向判断に影響するのだろうか？ 以下の心

理物理実験を行い、周波数チャンネル間の2次の相互作用までを考慮して検証した。

2.1 実験方法

空間周波数を8段階 (0.13 ~ 1.47 cycle/deg, 1/2オクターブ刻み), 時間周波数を9段階 (1.5 ~ 24.0 Hz, 1/2オクターブ刻み) に設定し, 上または下方向に動く正弦波縞を144種類 (8×9×2種類) 用意した。そして, 144種類の正弦波縞のなかから20種をランダムにサンプリングして, 単純加算したのち, CRTモニタ上の同心円領域 (偏心度5.0 ~ 7.0 deg) に提示した (周波数サンプリングの例を図1aに, 刺激のスクリーンショットを図1bに示す)。被験者は, 200ms間提示される刺激の運動方向を「上」か「下」の強制2択で回答する課題を繰り返し行った。CRTモニタの解像度は, 50 pixels/deg (観察距離1m), リフレッシュレートは, 120 Hzとした。各正弦波縞のコントラストは0 ~ 5%の間で一様ランダムに, 位相は0 ~ 2πの間で一様ランダムに変えて実験を行った。モニタの背景は輝度42.2 cd/m²の一樣な灰色で表示した。被験者は, 著者OWを含む3人で, 一人あたり12,500試行の判断課題

を行った。3名分をあわせた37,500試行をまとめてデータ解析した。

2.2 解析方法

正弦波縞刺激のコントラストに依存して運動方向判断がどのように決定されるのか, 以下では2次の影響までを考慮し, 次式で情報処理を定式化した。

$$F(\mathbf{s}) = m + \sum_i k(s_i) \cdot c(s_i) + \sum_{i < j} h(s_i, s_j) \cdot c(s_i) \cdot c(s_j) \quad (1)$$

ただし, s_i や s_j は144種類の正弦波縞のインデックス表記で, 空間周波数を f_x , 時間周波数を f_t とおくと, $s_1 = (f_{x1}, f_{t1})$, $s_2 = (f_{x2}, f_{t1})$, ..., $s_{144} = (f_{x8}, f_{t18})$ に対応する。また, 正弦波縞刺激 s_i のコントラストを $c(s_i)$ とした。そして, 実験データに基づき, $F(\mathbf{s}) > 0$ なら上方向運動, $F(\mathbf{s}) < 0$ なら下方向運動の判断と対応する非線形演算のカーネル (1次カーネル $k(s_i)$ ならびに2次カーネル $h(s_i, s_j)$) を推定した。

式(1)の定数項 m , 1次カーネル, 2次カーネルは, 式(2-1) ~ 式(2-3)のとおり, モーメント母関数の係数 G_0, G_1, G_2 から求められる。

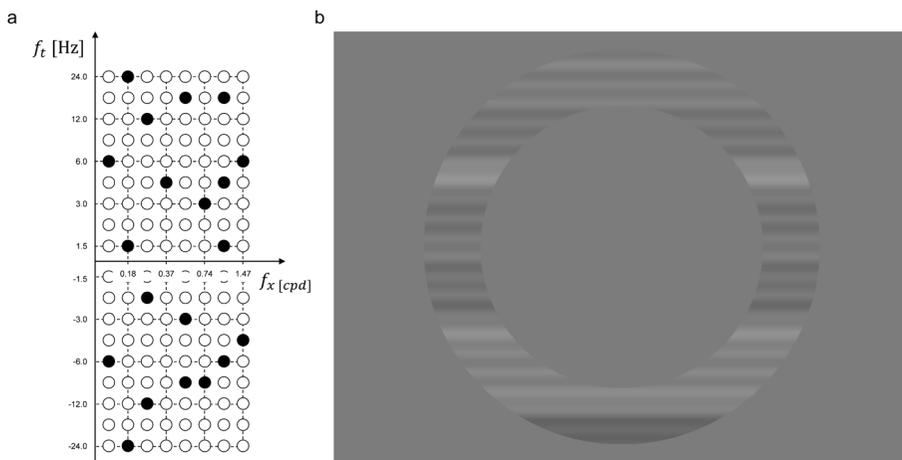


図1 a. 周波数の異なるさまざまな正弦波縞からのランダムサンプリング例。空間周波数を f_x , 時間周波数を f_t とし, 以下, 上方向の運動を正の時間周波数で, 下方向の運動を負の時間周波数で記述する。上方向に動く縞と下方向に動く縞がいろいろな混合比でランダムに20種同時提示された。b. 実験刺激のスクリーンショット。中心視野をさけた偏心度5.0 ~ 7.0 degの範囲にランダムサンプリングした20種の正弦波縞を重ね合わせて提示し, 被験者は運動方向を上下2択で回答した。

$$m = \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}G_0\right) \quad (2-1)$$

$$k(s_i) = e^{m^2} G_{1,i} \quad (2-2)$$

$$h(s_i, s_j) = \begin{cases} e^{m^2} G_{2,ij} + 2m \cdot k(s_i) \cdot k(s_j), & \text{if } i \neq j \\ e^{m^2} G_{2,ii} + m \cdot k(s_i)^2, & \text{if } i = j \end{cases} \quad (2-3)$$

ただし、関数 erf は、心理物理曲線としてよ

く用いられるシグモイド形状をした Gauss の誤差関数のことである。モーメント母関数の係数 G は、入出力応答の統計量（モーメント）を係数とした連立方程式を解くことで導出される。すなわち、被験者の応答 y について、「上」という回答を 1、「下」という回答を -1 と定義し、正弦波縞 s_i のコントラスト $c(s_i)$ を簡単のため c_i と表記するとき、次式で表される連立方程式を解く。

$$\begin{bmatrix} E[y] \\ E[yc_1] \\ \vdots \\ E[yc_{144}] \\ E[yc_1^2] \\ E[yc_1c_2] \\ \vdots \\ E[yc_{144}^2] \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \begin{bmatrix} 1 & E[c_1] & \cdots & E[c_{144}] & E[c_1^2] & E[c_1c_2] & \cdots & E[c_{144}^2] \\ E[c_1] & E[c_1^2] & \cdots & E[c_1c_{144}] & E[c_1^3] & E[c_1^2c_2] & \cdots & E[c_1c_{144}^2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[c_{144}] & E[c_1c_{144}] & \cdots & E[c_{144}^2] & E[c_1^2c_{144}] & E[c_1c_2c_{144}] & \cdots & E[c_{144}^3] \\ E[c_1^2] & E[c_1^3] & \cdots & E[c_1^2c_{144}] & E[c_1^4] & E[c_1^3c_2] & \cdots & E[c_1^2c_{144}^2] \\ E[c_1c_2] & E[c_1^2c_2] & \cdots & E[c_1c_2c_{144}] & E[c_1^3c_2] & E[c_1^2c_2^2] & \cdots & E[c_1c_2c_{144}^2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[c_{144}^2] & E[c_1c_{144}^2] & \cdots & E[c_{144}^3] & E[c_1^2c_{144}^2] & E[c_1c_2c_{144}^2] & \cdots & E[c_{144}^4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_0 \\ G_{1,1} \\ \vdots \\ G_{1,144} \\ G_{2,11} \\ G_{2,12} \\ \vdots \\ G_{2,144144} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$E[y]$ はデータから得られる応答 y の値の単純平均として求められる。同様に $E[y \cdot c_i]$ は、データから得られる応答 y とコントラスト値 c_i の積の平均値である。式(3-1)を、次のように、ベクトルおよび行列を用いて表記すると

$$\mathbf{a} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathbf{M} \mathbf{g} \quad (3-2)$$

行列 M の逆行列をつかって

$$\mathbf{g} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{a} \quad (3-3)$$

を計算することでモーメント母関数の係数 G を

求めることができる（詳細は、(渡部, 2011) 参照）。ベクトル \mathbf{a} と行列 M は、データサンプルからなるベクトル \mathbf{y} と行列 C を使って簡単に近似することができる。すなわち、応答 y の第 n 試行のデータサンプルを y_n とし、各試行における被験者応答を縦方向に並べたベクトルを \mathbf{y} とする（全試行数 = N ）。また、 c_i の第 n 試行のデータサンプルを $c_{i,n}$ とし、単項式（Volterra 級数の各項）を横方向に列挙し、試行回数ごとに、縦方向に並べた行列 C を定義する。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & c_{1,1} & \cdots & c_{144,1} & c_{1,1}^2 & c_{1,1} \cdot c_{2,1} & \cdots & c_{144,1}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & c_{1,N} & \cdots & c_{144,N} & c_{1,N}^2 & c_{1,N} \cdot c_{2,N} & \cdots & c_{144,N}^2 \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

このとき、ベクトル \mathbf{a} と行列 M は、それぞれベクトル \mathbf{y} と行列 C をつかって、次のように近似

することができる。

$$\mathbf{a} \approx \frac{1}{N} \mathbf{C}^T \mathbf{y}, \quad \mathbf{M} \approx \frac{1}{N} \mathbf{C}^T \mathbf{C} \quad (3-5)$$

データ解析のための matlab 関数ファイルならびに、同関数を使ったサンプルプログラムを学会誌『VISION』のウェブ公開サイト内 (<http://www.visionsociety.jp/vision.html>) 28 巻 1 号 (2016 年 1 月) のページ, ならびに Visiome (<https://visiome.neuroinf.jp/> 内 Watanabe's Volterra Kernel estimation method) にて公開しているの、あわせて参照されたい。

なお、以下の実験データの解析に際しては、刺激分布が、原点中心・円形対称ではないが、上述の解析手法によりバイアスを除去し、カーネルを推定した。

3. 結 果

3.1 1次カーネル

図 2a に 1 次のカーネル $k(s_i) = k(f_x, f_t)$ の推定結果を周波数空間上にマッピングして示す。横軸が空間周波数 f_x 、縦軸が時間周波数 f_t で、以下、上方向の運動を正の時間周波数で、下方向の運動を負の時間周波数で記述することとする。ピクセルの輝度がカーネル値の大きさを表

す。明輝度（白）が正値で上向きの運動方向判断への寄与を、暗輝度（黒）が負値で下向きへの寄与を示す。先行研究 (Hayashi et al., 2010) と同様、低空間周波数成分が、同方向の運動方向判断に寄与しているのに対し、高空間周波数成分は、運動方向判断に抑制的に寄与する（すなわち、上方向に動く高空間周波数成分は、下向きの判断に寄与する）ことが確認できた。図 2b は、1 次カーネルの周波数マップを 5 次曲面でフィッティングした結果である。

3.2 2次カーネル

つぎに、2 次のカーネル $h(s_i, s_j) = h(f_x, f_t, f_x', f_t')$ の推定結果を周波数空間にプロットして図 3 に示す。図の黒枠で囲まれた各パネルが、参照周波数 (f_x', f_t') を固定した際の 2 次カーネルの周波数マップ（横軸を空間周波数 f_x 、縦軸を時間周波数 f_t としたプロット）を表す。それぞれのパネルは、参照周波数の値に従って、横方向がその空間周波数 f_x' に、縦方向が時間周波数 f_t' に対応するよう配置されている。 $(f_x, f_t) = (f_x', f_t')$ のとき、2 次カーネルは、単一正弦波縞の 2 乗の寄与を表し、その値は各パネル内の点線枠で囲まれたピクセルに対応する。2 乗の項だけを取

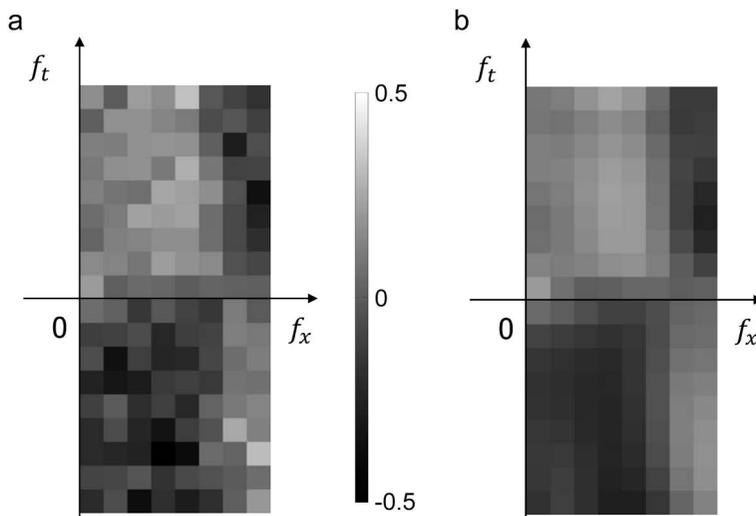


図 2 a. 1 次カーネル $k(f_x, f_t)$ の推定結果。横軸が空間周波数 f_x 、縦軸が時間周波数 f_t で、 f_t が正の領域は上方向、負の領域は下方向に動く正弦波縞の 1 次カーネル値を表す。各ピクセルの輝度がカーネル値の大きさを表し、明輝度が正値で上向きの運動方向判断への寄与を、暗輝度が負値で下向きへの寄与を示す。b. 1 次カーネル $k(f_x, f_t)$ の 5 次曲面によるフィッティング結果。

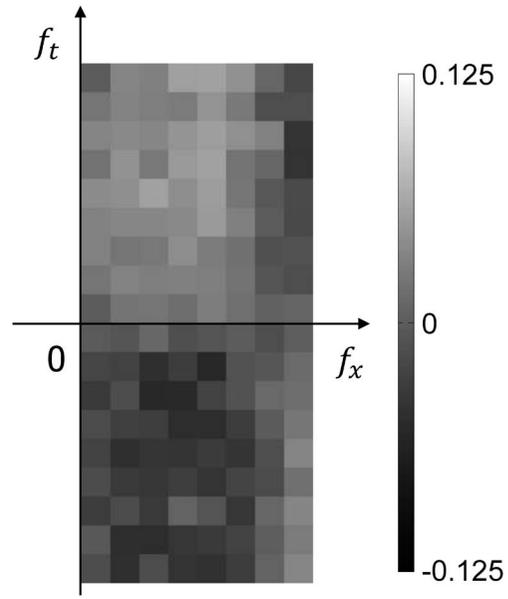
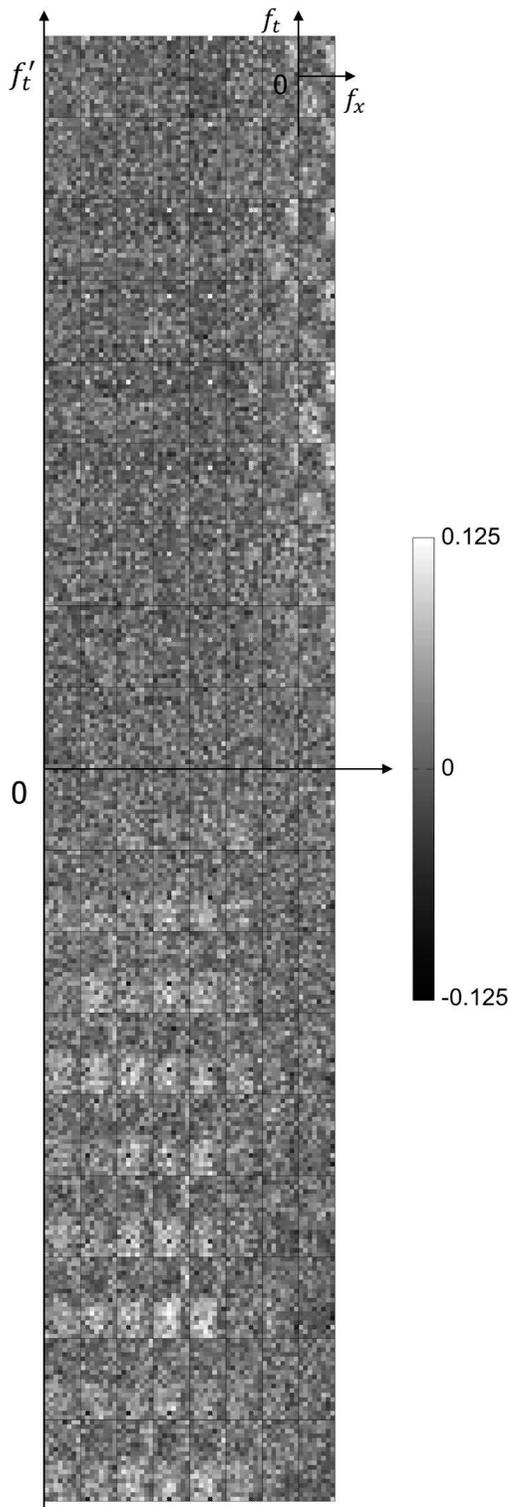


図4 2乗項の周波数マップ：横軸を空間周波数 f_x 、縦軸を時間周波数 f_t として、 $(f_x, f_t) = (f'_x, f'_t)$ となる場合の2次カーネルの値をプロットした。1次カーネルと類似していることがわかる。

り出して、時間・空間周波数マップで表示したものを図4に示す。2乗の項は、1次カーネルと同様、低空間周波数だと自身と同方向の運動方向判断に寄与しているのに対し、高空間周波数だと反対方向の判断に寄与している。

一方、図3の2次カーネルの分布をみると、 $(f_x, f_t) = (f'_x, f'_t)$ の近傍に一定の規則性のあるパターンが出現している。

ここで、式(2-3)より、2次カーネルには、

図3 2次カーネルの周波数マップ（ただし、以下では、 $h(f_x, f_t, f'_x, f'_t) = h(f'_x, f'_t, f_x, f_t)$ と対称性を仮定して図示）。黒線で囲まれた各パネルが、参照周波数 (f'_x, f'_t) を固定した際の2次カーネルの周波数マップ (f_x, f_t) を表す。各パネルの横軸が空間周波数 f_x 、縦軸が時間周波数 f_t であり、各ピクセルの輝度が2次カーネル値の大きさを表す。明輝度が正值で上向き運動方向判断への寄与を、暗輝度が負値で下向きへの寄与を示す。各パネルは、その参照周波数に対応するように、横方向を f'_x 、縦方向を f'_t の値にあわせて配置されている。各パネル内の点線で囲ったピクセルは $(f_x, f_t) = (f'_x, f'_t)$ となる2乗項の値で、1次カーネルと類似した分布が出現している（図4参照）。また、 $(f_x, f_t) = (f'_x, f'_t)$ の近傍に一定のパターンがみられる。

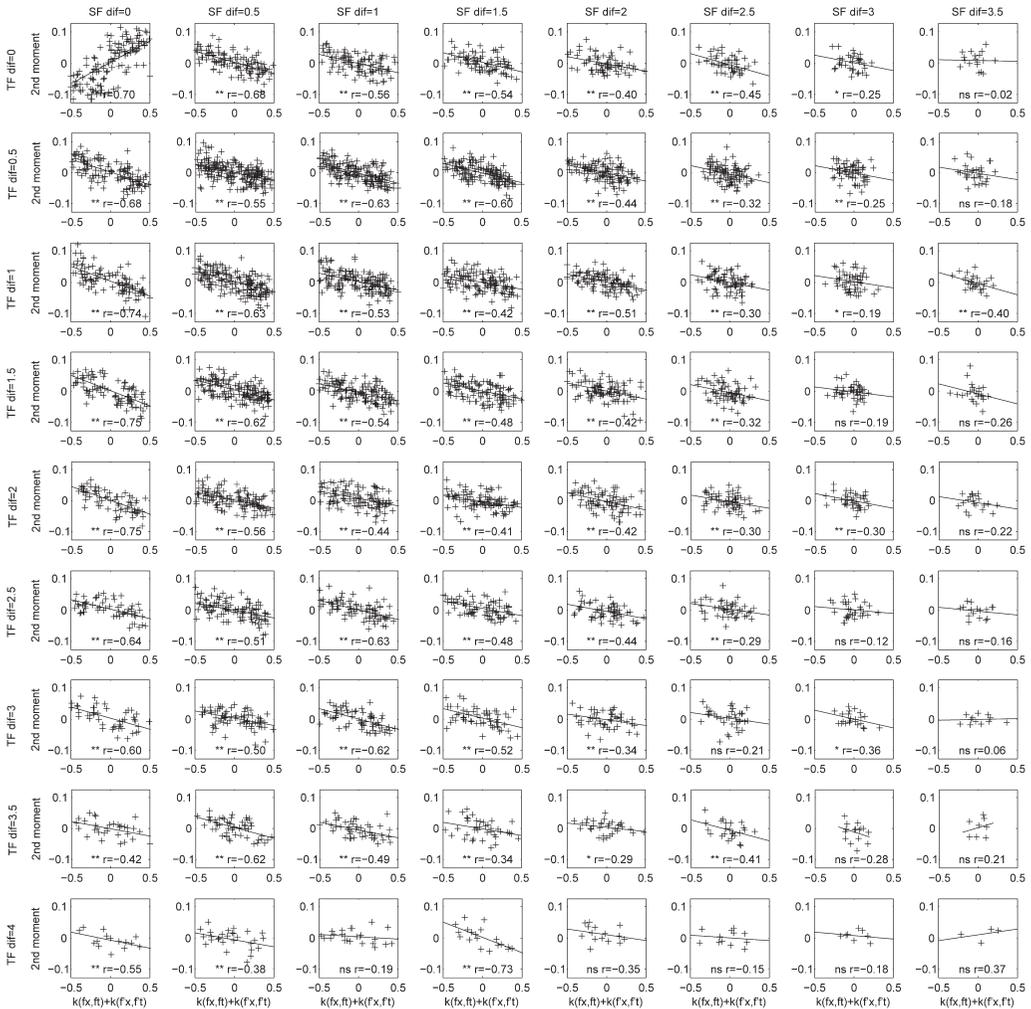


図5 1次カーネルと $k(f_x, f_i) + k(f'_x, f'_i)$ と2次モーメント係数 $G_2(f_x, f_b, f'_x, f'_i)$ の比較 (f_i と f'_i が同符号で、運動方向が同じ場合)。左上角のパネルは、2乗の項(周波数差ゼロ, $(f_x, f_i) = (f'_x, f'_i)$)との比較結果を表す。各パネルは、上から下に向かって、時間周波数差 $(|f_i|$ と $|f'_i|$ のオクターブ差)が大きくなり、左から右に向かって空間周波数差(f_x と f'_x のオクターブ差)が大きくなる条件での比較結果を表す。2乗項を除き、周波数差が小さいほど、強い負の比例/相関関係があることがわかる。

1次カーネルの積で表される $k(f_x, f_i) \cdot k(f'_x, f'_i)$ の項があるが、これらの項を除外した2次のモーメント母関数の係数 $G_2(f_x, f_b, f'_x, f'_i)$ (以下2次モーメント係数とよぶ)においても、一見して1次カーネル $k(f_x, f_i)$ と $k(f'_x, f'_i)$ に依存したパターンが認められる。1次カーネルの和, $k(f_x, f_i) + k(f'_x, f'_i)$ と2次モーメント係数 $G_2(f_x, f_b, f'_x, f'_i)$ がどのような関係にあるか、二つの正弦波縞の空間周波数差($|f_x - f'_x|$)と、時間周波数差($||f_i| - |f'_i||$)ごとに分けて解析した

結果を図5と図6に示す。図5は、 f_i と f'_i が同符号(二つの正弦波縞の運動方向が同方向)の場合を、図6は、異符号(運動方向が逆方向)の場合をそれぞれ表示した。

図5左上角のプロット図は、1次カーネルと2乗項のモーメント係数の比較プロットであり、相関係数も大きく、勾配=0.70と比較的大きな正の相関があることが確認できる。一方、二つの正弦波縞が周波数空間において近傍にある場合、2次モーメント係数は、1次カーネル

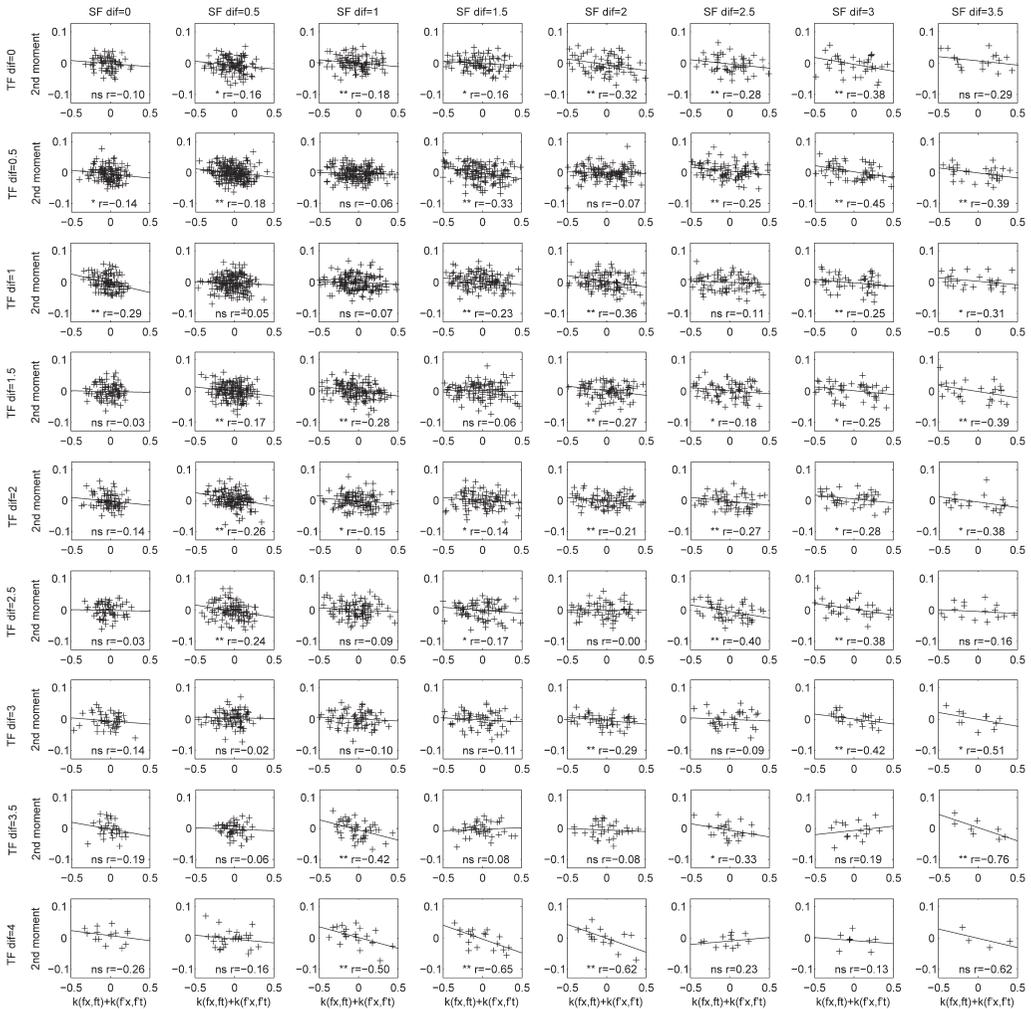


図6 1次カーネル和 $k(f_x, f_t) + k(f_x, f_t)$ と2次モーメント係数 $G_2(f_x, f_b, f_x, f_t)$ の比較 (f_t と f_t' が異符号で、運動方向が反対の場合)。左上角のパネルは、 $(f_x - f_t) = (f_x, f_t)$ となる条件で、1次カーネル和と2次モーメント係数を比較した結果である。反対方向に動く正弦波縞どうしでは、周波数差が小さいと、1次カーネル和と2次モーメント係数に相関がないことがわかる。一定の周波数差があると有意な負の相関関係が現れる。

の和と負の相関がある。勾配は -0.68 と比較的大きく、周波数差が大きくなるほど、相関係数、勾配ともにゼロに漸近し、有意差も縮小する。

これに対し、図6で示した二つの正弦波縞が反対方向に動く場合、傾向は大きく異なる。周波数差が小さいと、2次モーメント係数は、1次カーネルとほとんど相関をもたないが、周波数差が大きくなると、負の相関が現れ、相関係数や勾配が大きくなり、有意差も拡大する。

上記でもとめた1次カーネルと2次モーメント係数の比例勾配を、時間・空間周波数差でプ

ロットしたマップが、図7aである。上段が二つの正弦波縞が同方向に動く場合、下段が反対方向に動く場合の勾配値をピクセルの濃淡で表現している。明輝度が正の勾配を、暗輝度が負の勾配を表す。横軸が空間周波数差($f_x - f_x'$)、縦軸が時間周波数差($|f_t| - |f_t'|$)を表し、中央が周波数差ゼロの勾配値である(中央の白い点が、2乗項の勾配値に対応する)。図7bは、2乗項を除外して図7aの勾配マップを2次曲面でフィッティングした図である。時間・空間周波数差に対してほぼ単調に勾配が変化している

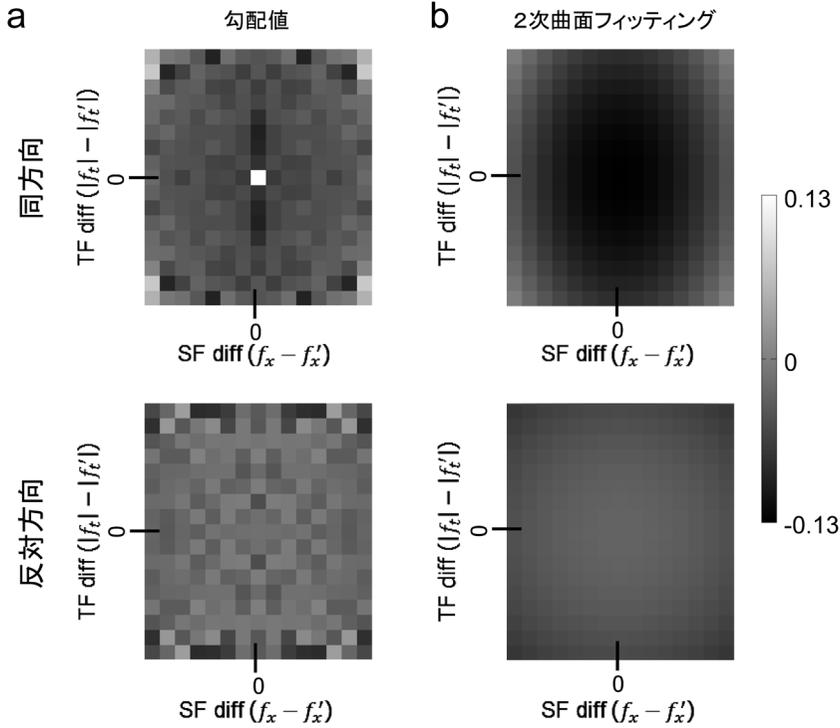


図7 時間・空間周波数差に依存した、1次カーネル和と2次モーメント係数間の勾配値の変化。上段が f_t と f'_t が同符号（二つの正弦波縞が同方向に動く）の勾配値，下段が異符号（逆方向に動く）の勾配値を表す。a. 1次カーネルと2次モーメント係数の勾配値プロット。パネル中央が周波数差ゼロ（2乗項の勾配値）を表す。横軸が空間周波数成分差を，縦軸が時間周波数成分差をあらわす。b. 勾配値変化の分布を2次曲面でフィッティングした結果。

ことに加え，空間周波数差の変化に対して勾配値の変化がより大きいことがわかる。

以上の結果から，図7bに示した勾配値の分布を，空間周波数差，時間周波数差，運動方向の異同に依存した関数 $W(|f_x - f'_x|, ||f_t| - |f'_t||, \text{sign}(f_t \cdot f'_t))$ とおくと，2次カーネルは1次カーネルを使って次式で記述することができる。

$$\begin{aligned}
 h(f_x, f_b, f'_x, f'_t) \\
 = -(k(f_x, f_t) + k(f'_x, f'_t)) \cdot \\
 W(|f_x - f'_x|, ||f_t| - |f'_t||, \text{sign}(f_t \cdot f'_t)) \\
 + 2m \cdot k(f_x, f_t) \cdot k(f'_x, f'_t) + e \quad (4)
 \end{aligned}$$

2次カーネルを式(4) (1次カーネルの関数モデル) で近似した場合の残差 e を周波数マップとして再プロットしてみると，依然として規則的なパターンが残存する。これまでの解析

から，2次カーネルの値は，時間周波数の符号に大きく依存するものの，時間周波数の絶対値の違いによる変化は相対的に小さい。そこで，残差 e を時間周波数の符号別に平均化し，空間周波数 f_x, f'_x の関数としてプロットしたのが，図8である。二つの正弦波縞が同方向に動き（図8右上および左下パネル），互いに高空間周波数の場合，残差 e が大きな値になることがわかる。上方向に動く場合($f_t > 0, f'_t > 0$)には，正值に（上方向への回答を促進する効果），下方向に動く場合($f_t > 0, f'_t < 0$)には，負値になるが，符号をのぞいて空間周波数依存性はよく似ている。

この残差 e の効果は，1) 空間周波数 f_x または f'_x に依存する関数の和： $Q(f_x) + Q(f'_x)$ と，2) 空間周波数差($f_x - f'_x$)の関数 $R(|f_x - f'_x|)$ ，3) 二つの正弦波縞の運動方向： $\text{sign}(f_t) + \text{sign}(f'_t)$ の積によって，ほぼ説明することができる。関数

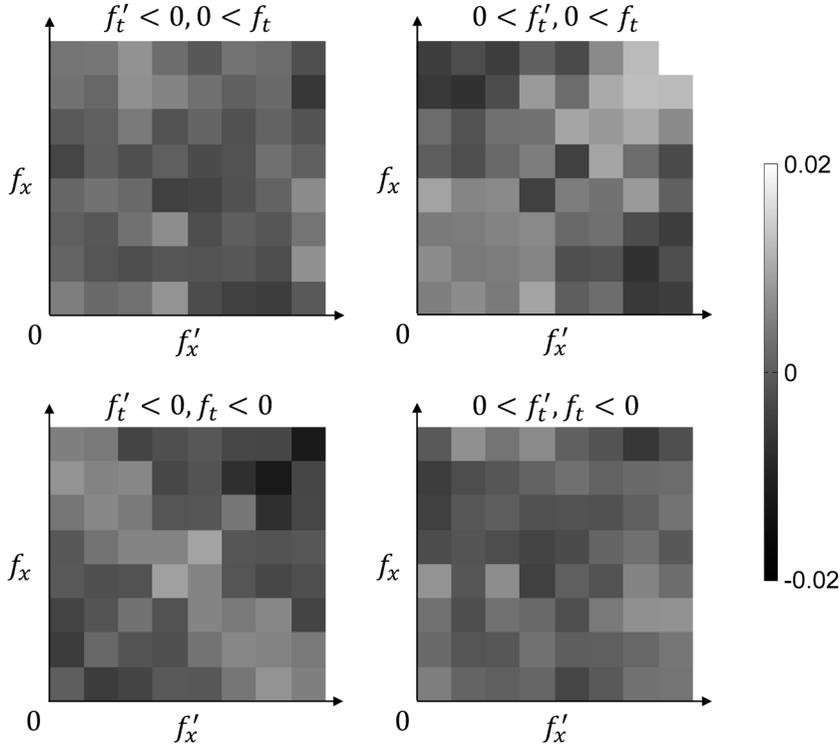


図8 残差 e を時間周波数の符号別に平均化し、空間周波数 (f_x, f_x') の関数としてプロットした。高空間周波数の二つの正弦波縞が同方向に動くとき（右上および左下のパネル）、大きな値が認められる。上方向に動く場合 $(f_t > 0, f_t' > 0)$ には、正の値に（上方向への回答を促進する効果）、下方向に動く場合 $(f_t < 0, f_t' < 0)$ には、負の値になるが、符号をのぞいて空間周波数依存性はよく似ている。

$Q(f_x)$ は、高空間周波数にピークをもち、側抑制のあるチューニングカーブを示す。これに対し、 $Q(f_x)$ が与えられたとき、2次曲線で残差 e をフィッティングして得られる $R(|f_x - f_x'|)$ は、空間周波数差に依存して単調に減少する関数となっている。

高空間周波数にピークをもつ関数 $Q(f_x)$ の形状は、1次カーネルを運動方向別（時間周波数の符号別）に平均化したものを、定数から引いた関数で近似できる。

$$Q(f_x) = \sum_{f_t > 0} \alpha \cdot \text{sign}(f_t) - \beta \cdot k(f_x, f_t) \quad (5)$$

したがって、2次モーメント係数は、1次カーネルに加え、単純に正弦波縞の運動方向 $\text{sign}(f_t)$ に依存した効果で説明できることが示唆される。

そこで、あらためて、2次モーメント係数を

次式でモデル化し、2次曲面を使って、重み関数 W_1, W_2 をフィッティングによって求めると、図9の重み関数が得られた。

$$\begin{aligned} G_2(f_x, f_t, f_x', f_t') &= -(k(f_x, f_t) + k(f_x', f_t')) \\ &\quad W_1(|f_x - f_x'|, ||f_t| - |f_t'||, \text{sign}(f_t \cdot f_t')) \\ &\quad + (\text{sign}(f_t) + \text{sign}(f_t')) \cdot \\ &\quad W_2(|f_x - f_x'|, ||f_t| - |f_t'||, \text{sign}(f_t \cdot f_t')) + \epsilon \end{aligned} \quad (6)$$

二つの正弦波縞が同方向に動くとき、1次カーネルの重み W_1 は、図7と同様、周波数差に依存して単調に減少する抑制性の重みとなっている。一方、 W_2 は周波数差に依存して単調に減少する重みで、周波数差が小さいときは正值で、運動方向を促進する効果として作用する。周波数差が大きいと W_2 は負の値となり

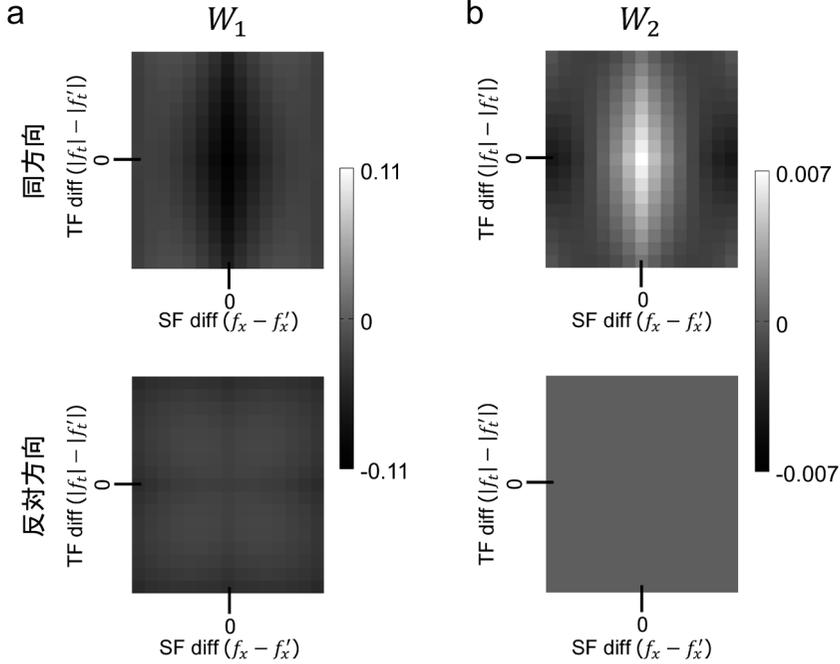


図9 重み関数 W_1 と W_2 の推定結果. 上段: f_t と f'_t が同符号で運動方向が同じ場合. 下段: f_t と f'_t が異符号で運動方向が反対の場合. それぞれ横軸が空間周波数差 $f_x - f'_x$, 縦軸が時間周波数差 $|f_t| - |f'_t|$ を表す. 中心が周波数差ゼロの点である. a. W_1 は, 二つの成分が同方向運動で, 周波数空間内で近傍にあるとき, 大きな負の値をとる. 周波数差が大きくなるとゼロに漸近する. 二つの成分が反対方向の運動の場合, W_1 は, 周波数差が大きな条件で, 若干の負値を示す. b. W_2 は, 二つの成分が近傍にあるとき, 正值を示し, 周波数差が大きくなるほど, 低下し, やがて負値となる. 二つの成分が反対方向の運動の場合, W_2 は定義されない ($\text{sign}(f_t) + \text{sign}(f'_t) = 0$ となるため).

抑制的になる. 二つの正弦波縞が反対方向に動くとき, W_1 は, 周波数差が一定以上大きくなると抑制性の重みとして作用する. W_2 は $\text{sign}(f_t) + \text{sign}(f'_t) = 0$ となるため定義されない. 式(6)によるフィッティング後の残差 ε のなかに, 規則的なパターンは残っていないことから, 2次カーネルの主要な効果は, 式(6)の定式化によって説明できたと解釈できる.

以上の結果をまとめると, 2次カーネルは, 1次カーネルに依存したモデルに, 運動方向(時間周波数の符号)に依存した効果を加えた次式で定式化できることが明らかになった.

$$h(f_x, f_b, f'_x, f_t) = -(k(f_x, f_t) + k(f'_x, f_t)) \cdot W_1(|f_x - f'_x|, ||f_t| - |f'_t||, \text{sign}(f_t \cdot f'_t))$$

$$+ (\text{sign}(f_t) + \text{sign}(f'_t)) \cdot W_2(|f_x - f'_x|, ||f_t| - |f'_t||, \text{sign}(f_t \cdot f'_t)) + 2m \cdot k(f_x, f_t) \cdot k(f'_x, f_t) + \varepsilon \quad (7)$$

3.3 2次カーネル行列の固有値解析

ここまでは, 2次カーネルの周波数空間内での分布構造を詳細に解析してきた. これに対し, 2次カーネルを行列表現し, その固有値と固有ベクトルを使えば, 144種類の正弦波縞がどのような組み合わせで提示されたとき, 上下の運動方向判断にどのように影響するか解析することができる. 以下, 2次カーネル行列の固有値解析方法と結果について紹介する.

2次カーネルの運動方向判断に与える影響は, 各正弦波縞のコントラストを独立変数としてとらえると, $h(s_b, s_j) \cdot c(s_b) \cdot c(s_j)$ となり, $h(s_b, s_j)$ を行列形式で表現した H とベクトル $c(s)$ を使っ

て次式で記述される（ただし、 $i \neq j$ となる非対角成分は、計算が重複するので、1/2倍して行列 H を定義する）。

$$c(s)^T H c(s) \quad (8)$$

式(8)が正になれば、上向きの運動方向判断に、負になれば下向きの運動方向判断に寄与することになる。一方、行列 H を固有値分解したときにえられる固有値を λ 、長さが1の固有ベクトルを \mathbf{v} とおくと、次式の関係がなりたつ。

$$\mathbf{v}^T H \mathbf{v} = \lambda \quad (9)$$

このことは、固有ベクトルの係数で重みづけ

られた正弦波縞の組み合わせは、固有値の分だけ運動方向判断に影響することを意味する。固有値が正なら、上方向に、固有値が負なら下方向に寄与することになる。したがって、2次カーネル行列 H を固有値分解すれば、どういった正弦波縞の組み合わせ（固有ベクトルの係数）が、どちらの運動方向（固有値の符号）の判断に、どれだけ寄与するか（固有値の絶対値）を知ることができる。

2次カーネル行列から固有値を求め、絶対値の大きい順に固有ベクトルの係数をプロットしたのが図10である。上段が正の固有値、下段が負の固有値をもつ固有ベクトルの係数で、係数は、対応する正弦波縞の周波数マップとしてプロットした。図10左列から順に、絶対値の

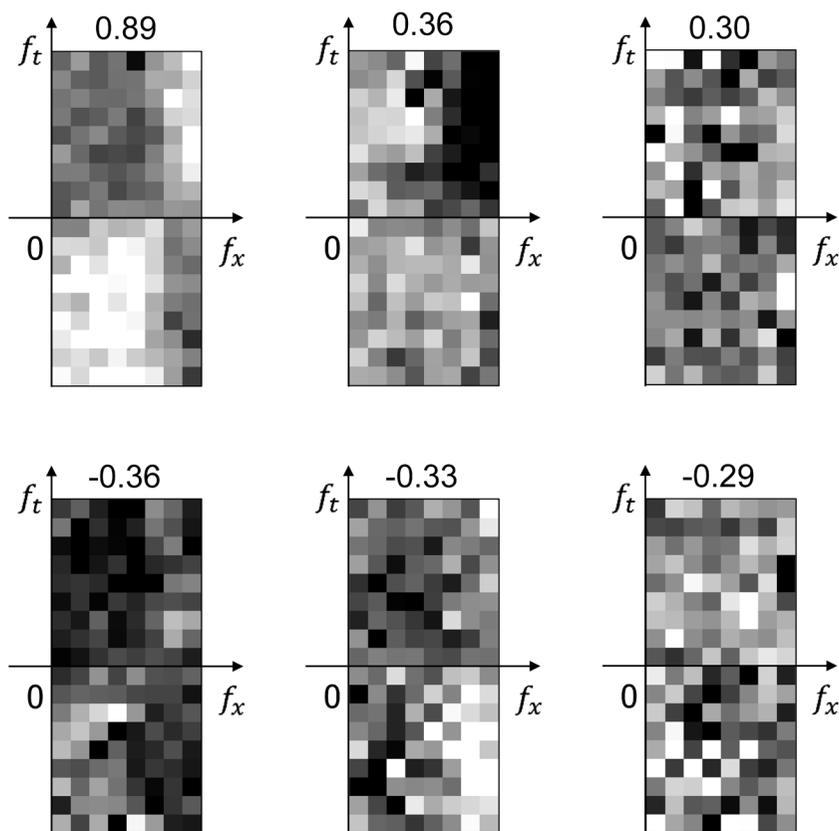


図10 2次カーネルの行列表現を固有値分解した結果。各図は対応する固有ベクトルの係数を周波数空間に対応つけて表現しており、図の上に表示された数値が固有値を表す。上段が正の固有値、下段が負の固有値で、左から固有値の絶対値が大きい順に配置した。固有値の絶対値が大きな上位4つには、それぞれ、低空間周波数と高空間周波数領域に大きな係数が偏っている。

大きい固有値に対応する固有ベクトル係数のマップが並んでいる。固有ベクトルに符号や定数倍の任意性があることに注意して解釈すると、図10左列の結果は、上方向判断（正の固有値）に、上向き運動する高空間周波数成分と下向き運動する低空間周波数成分が寄与していることを示している。一方、下方向判断（負の固有値）には、下向き運動する高空間周波数成分と上向き運動する低空間周波数成分が寄与している。図10中列では、上方向の運動判断に、上向き運動する高空間周波数成分が、下方向の運動判断に、下向き運動する高空間周波数成分が寄与している。図10右列に示したように、固有値の絶対値上位5位以下では、意味のあるパターンが認められなかった。

一方、2次カーネルから1次カーネル依存の

効果を除いた残差を行列表現し、固有値分解した結果を図11に示す。上向きの運動方向判断（正の固有値）には、上向きの低空間周波数か、上向きの高空間周波数が互いに逆符号の重みで寄与しているのに対し、下向きの運動方向判断（負の固有値）には、下向きの低空間周波数か、下向きの高空間周波数が互いに逆符号で寄与している。上位3位以下の固有値に対応する固有ベクトル係数には、解釈可能なパターンが消失している。

最後に、2次カーネルから、式(7)（1次カーネルに依存した効果ならびに時間周波数の符合に依存した効果）を除外した後の残差 ε を行列表現し、固有値分解したが、固有値は小さな値しかとらず、固有ベクトルのマッピング結果にも意味のあるパターンが見出せなかった。この

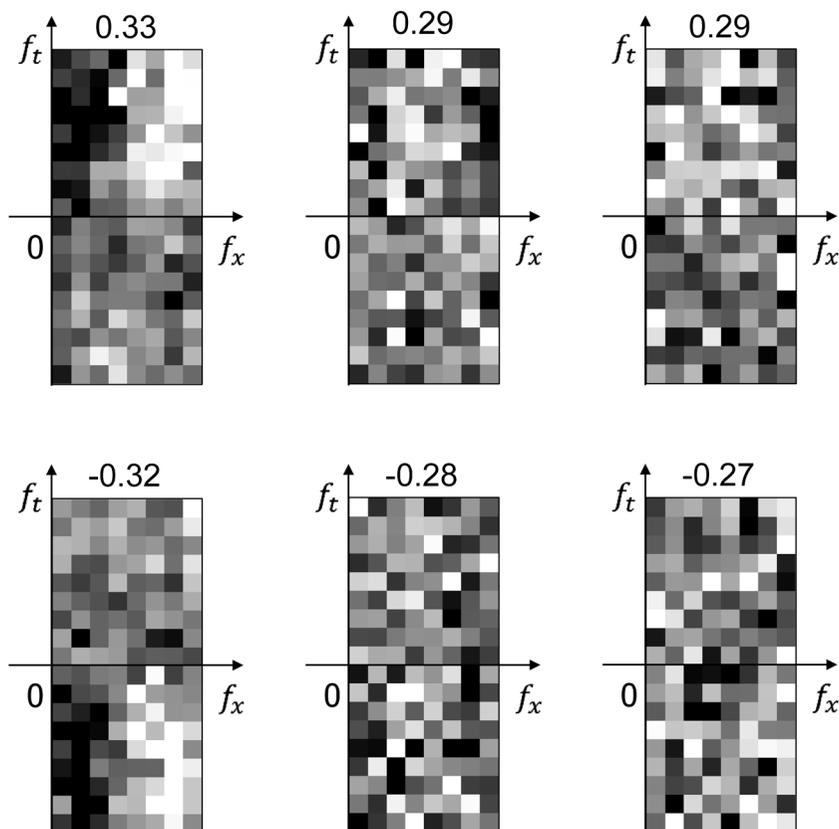


図11 2次カーネルから1次カーネル依存の効果を除外した残差の行列表現を固有値分解した結果。固有値の絶対値が大きな上位2つには、それぞれ、低空間周波数と高空間周波数領域に大きな係数が偏っている。固有値が正の場合、時間周波数が正の領域に、固有値が負の場合、時間周波数が負の領域に偏りがみられる。

ことから、式(7)で提案した定式化により、2次カーネルの主要な効果が説明されたと解釈できる。

4. 考 察

以上の実験結果から、さまざまな周波数成分を持つ正弦波縞が同方向か逆方向に混在して存在する場合、主として低空間周波数成分の方向に依存して運動方向判断の決定を行っていて、高空間周波数成分は、むしろ逆方向の運動方向判断に寄与することが確認できた(1次カーネルの寄与)。そうした、周波数成分間の重みづけは、周波数成分間の相互作用によって修飾され、同方向に動く周波数成分の存在は、周波数空間内の距離と1次カーネルの重みに依存した2次カーネルによってモデル化できることを示している。一方、逆方向に動く成分どうしは、一定の周波数差がある場合に、互いの1次カーネルに依存した作用があることが明らかになった。こうした2次カーネルの影響は、1次カーネルを使った関数モデルで記述することができる。しかしながら、1次カーネルの関数モデルでは吸収しきれない効果も残存した。それは、二つの正弦波縞が、同方向に動く場合にのみ作用する効果で、両者が周波数空間内で近傍にある場合、当該方向への判断を促進する効果として作用する。この非1次カーネル依存の効果は、二成分の周波数差が大きくなると抑制的に作用する。

また、2次カーネルで与えられる行列を固有値分解すると、その固有値の符号と、絶対値、ならびに固有ベクトルの係数により、どの正弦波縞の組み合わせが、どちらの運動方向にどれだけ寄与するかがわかる。2次カーネルの効果は、1次カーネルの示す特徴に沿って、低空間周波数と高空間周波数に分けて考えると理解できる。提案モデルで近似したあとの残差行列には、固有値分解して解析しても、解釈可能なパターンが残っていない。この結果は、我々のモデルにより2次カーネルの主要な効果が十分説明できた証左といえる。

今回、運動方向判断における周波数チャンネル間の統合メカニズムを調べるにあたり、2次の非線形性を考慮して、20種類の周波数成分が混在する条件下で運動方向判断を記述するモデルを確立することに成功した。しかしながら、次のような思考実験から、このモデルの限界も明らかになる。たとえば、一つの正弦波縞で構成される刺激(時空間周波数成分は一つだけ)に対するモデルの応答を考える。このとき、他の時空間周波数成分が存在しないため、2次カーネルの効果がなくなり、1次カーネルの寄与だけで反応が決定されることになる。したがって、高空間周波数の正弦波縞が提示される際は、1次カーネルの符号に従い、反対方向の運動が知覚されることをモデルは予測する。しかし、高空間周波数の正弦波縞の運動は、運動方向判断が難しくなることがあっても、常に反転して知覚されることはない。モデルが背後の神経メカニズム構造の推定に成功しているといえる必要条件是、任意の刺激入力に対して運動方向判断を予測できることである。この思考実験の失敗が意味することは、今回推定されたモデルは、特定の時空間周波数サンプルリングに依存した機能的モデルにすぎないということである。さきほどの思考実験から、もし、1次カーネルが、個々の周波数チャンネルの運動方向判断への直接的な寄与を示すのであれば、1次カーネルは、単純に時間周波数の符合のみに依存する形で推定され、周波数チャンネル間の相互作用は2次カーネルに現れることが期待される。一方で、実験条件に偏りがあって、一定の相互作用が常に存在する場合、そうした相互作用は、1次カーネルとして推定されることになる。実験では、20種類の周波数成分が常に混在する条件下で運動方向判断を検証した。このため、ほとんどの場合、高空間周波数と低空間周波数が随伴して提示されることとなり、低空間周波数に対する高空間周波数の抑制的効果が定常的に作用していたため、1次カーネルとして推定されたと考える。仮に、サンプリングする周波数成分の個数を20個に限定せず、1～

20個と一様ランダムに変化させて実験できれば、実際の周波数統合メカニズムに近いモデルが推定できたのではないかと予想される。しかしながら、全条件探索に近い実験は、必要となる試行回数の爆発を招き現実的ではなかった。したがって、本実験では、高空間周波数チャンネルから低空間周波数チャンネルの抑制効果が作用する条件下において、周波数チャンネル間でさらにもどのような相互作用があるかをモデル化したと解釈すればよい。

本実験をとおして、周波数チャンネル間には、周波数空間内での距離に依存した相互作用があることを明らかにした。それは、1次カーネルとして現れる効果を緩和するとともに、個々の周波数チャンネルが、その運動方向（時間周波数の符合）に直接寄与する効果として解釈可能であった。2次の相互作用をこれほど定量的に、解釈可能な形でモデル化できたのは、渡部の提案した非線形カーネル推定法が、従来法の推定バイアスを回避でき、モデルパラメータを比例関係ではなく、等号関係から解くことができる手法であったことが、要因の一つとして考えられる。

5. むすび

渡部の非線形カーネル推定法を利用して、運動方向判断における周波数チャンネル間の統合メカニズムを2次の相互作用まで考慮してモデル化した。われわれの実験条件では、高空間周

波数チャンネルから低空間周波数チャンネルへの抑制効果が、1次カーネルの効果として、常に存在するやや特殊な状況下であるものの、周波数チャンネル間の相互作用が周波数差に依存して作用することを明らかにした。定量的で、解釈可能な2次カーネルのモデル化に成功したことは、渡部の非線形カーネル推定法の有効性を示唆すると考える。

謝 辞 解析データの利用を快くご承諾いただいた渡部さんのご遺族に感謝いたします。また、東京工科大学の菊池眞之さん、熊本大学の寺本渉さんには、ご遺族や関係者との連絡に際し、ご協力いただきました。室蘭工業大学の鈴木幸司先生には、渡部さんのPCデータ回復にご協力いただきました。改めて御礼申し上げます。

文 献

- 1) 渡部 修：任意の刺激分布を用いた心理物理学的な知覚判断特性の推定。電子情報通信学会技術研究報告，NC2010-181, 2011.
- 2) R. Hayashi, Y. Sugita, S. Nishida and K. Kawano: How motion signals are integrated across frequencies: Study on motion perception and ocular following responses using multiple-slit stimuli. *Journal of Neurophysiology*, **103**, 230–243, 2010.