

仮現運動における2種類の反転知覚

蘆田 宏

ATR 人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2

1. はじめに

運動知覚機構のモデルとしてのフーリエエネルギー抽出型検出機構については、一定の評価が定まってきたように思われる。しかし、人間の運動検出においてはそれとは別の、おそらく特徴点間の対応に基づく機構が併存している可能性が示されつつある。そうした機構に関しては研究の方向性すら明確でない面があることは否定できない。本研究は、これまでの低次運動知覚研究の延長線上にあるボトムアップ中心の研究手法でそうした機構をとらえていこうとする試みの1つである。

方形波から基本波成分を取り除いた波形をもつ縞刺激 (Missing Fundamental Grating, MFG) を基本波周期の $1/4$ ステップで仮現運動させた場合、条件によって知覚される運動方向が逆転する^{1, 2)}。この刺激では、フーリエ成分すなわち方形波における3次高調波成分の運動方向と、もとの基本波周期に相当するパターンの運動方向が逆転している。この刺激は全般に、単眼提示で、提示フレーム間に刺激間間隔 (inter-stimulus interval, ISI) がない場合にはフーリエ成分の方向に動いて見え、両眼別提示あるいは適度な ISI とともに提示されるとパターン方向に動いて見える。

フーリエ方向の運動は1次の運動検出器によって説明できるが、ISIによるパターン方向の運動の原因については必ずしも明らかではない。少なくとも、1) 1次運動検出器そのものがISIによって反転する^{3, 4)}、2) 視覚系の歪

みによって基本波に相当する成分が生じる⁵⁾、

3) 2次運動機構の非線形性により基本波に相当する成分が生じる⁶⁾、4) 特徴追従に基づく運動視機構が関与するという可能性が想定できる。本研究では、このうちの1) について検討するため、パターンとフーリエ成分の運動方向が相反する複合波形縞及び、その要素の正弦波縞を用いて運動方向知覚を比較した。複合縞としては、MFGと同様のISIによる反転を示し、より単純な周波数構造を持つ刺激として、3次及び4次の高調波による複合波形縞 ($3f + 4f$ 縞と略記) を使用した。

2. 方法

刺激はIBM-PC 互換機を用いてCRT 上に表示し⁷⁾、実体鏡を用いて左右眼に独立に提示した (8 bit/pixel, 平均輝度 14.6 cd/m^2)。縦の縞刺激を $SD = 1 \text{ deg}$ の Gabor 窓中に提示、横方向に $3f + 4f$ 縞のパターン周期の $1/4$ (3次高調波周期の $3/4$) ずつ仮現運動させ、運動方向知覚確率を刺激コントラストの関数として測定した。

運動刺激は断続的に5フレーム提示された。単眼条件では、刺激は全てのフレームにおいて左眼あるいは右眼のみに提示され、反対の眼には一様な背景が提示された。両眼別条件では、1フレームおきに左眼、右眼に刺激が提示され、一方の眼に刺激が出ているときにはもう一方の眼には一様な背景が提示された。各フレームの提示時間は80 ms、ISIは0 ms及び80 msとした。刺激コントラストは $3f + 4f$ 刺激における0.02から0.32の7段階に設定した。図1

に、 $3f + 4f$ 縞の概要を $x-y$ 及び $x-t$ プロットで示す。実際には中央に十字形の注視点が赤色で表示された。両眼融合を確認するため、試行開始前には十字の上下の線をノニウス線のように両眼で半分ずつにした。被験者は、刺激提示後にマウスボタンを用いて知覚された運動方向を強制選択で報告するよう求められた。

ISI がある場合に 1 次検出器の反応と比較するため、ISI = 80 ms において $3f$ に相当する正弦波縞を用いて同様の測定を行った。 $3f$ 刺激のコントラストは $3f + 4f$ の要素と同じになるよう調整された。連続的な仮現運動事態では運動方向の反転はおこりにくい可能性があるため、 $3f$ 縞でフレーム時間を 500 ms とし、80 ms の ISI をはさんで 2 フレームだけ提示する条件を設けた。

実験は ISI 別に行われ、提示眼条件、運動方向及び刺激コントラストはセッション内でランダム化された。

3. 結果

2 名の被験者の結果を図 2 に示す。 $3f + 4f$ 縞の場合、単眼で ISI が無いときには全般に運動は $3f$ すなわちフーリエ成分に従って知覚された。ただし、コントラストが高くなるとフーリエ方向の運動知覚確率はむしろ低下した。それ以外の場合には逆にパターン方向に知覚されたが、ISI = 80 ms においては単眼及び両眼別提示のコントラスト応答はほとんど一致するもの

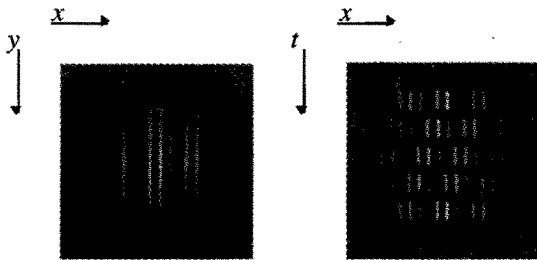


図 1 $3f + 4f$ 運動刺激の $x-y$ 及び $x-t$ プロット

となった。ISI = 80 ms の実線および破線と、ISI = 0 ms の破線は結果に Weibull 関数をあてはめたものである。ISI = 0 ms においては、実線は破線をもとに、単眼条件の結果を $3f$ 成分に対する 1 次エネルギー検出機構の出力との差分として推定したものであり、その過程で推定された 1 次機構の応答特性がグレーの太線である。ここでは 2 種類の検出機構の出力の統合について、差分をとるといふきわめて単純な方法にもかかわらず、得られた曲線は結果をかなりよく表現しているといえる。

一方、 $3f$ 縞の場合 (図 3)、5 フレーム、ISI = 80 ms では運動方向の反転が見られなかった。両眼別提示の場合、方向弁別は単眼提示に比べて難しくなり、被験者 MK においてはコントラストに関わらず方向判断がほとんどできなくなった。

$3f$ 縞で、500 ms の 2 フレーム提示の場合に

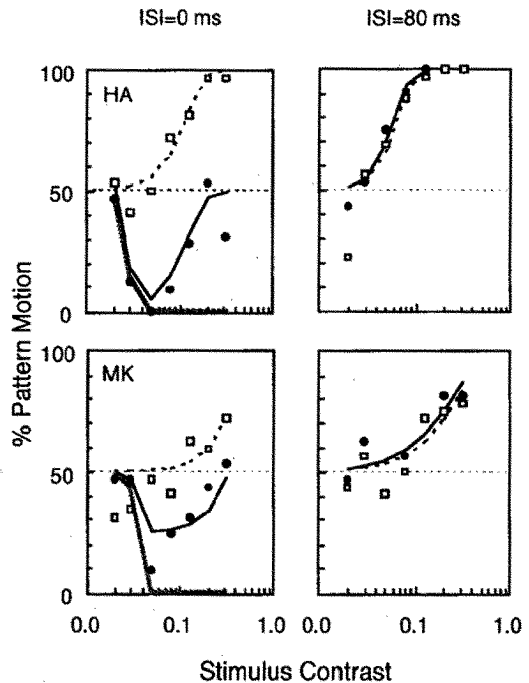


図 2 $3f + 4f$ 縞刺激の結果。黒丸は単眼、白四角は両眼別提示条件を示す。曲線に関しては本文を参照。

は、弱いながらも反転の傾向が見られた。反転が起こった場合でも確率は50%強でしかないが、曲線は明らかに中コントラスト領域で形が変わっており、異なる反応の存在が示唆される。被験者の主観としても、その領域では運動はかなりはっきり見えており、確率としては高くはないものの、反転は起こったと考えられる。

4. 考察

3f + 4f 刺激と 3f 刺激では明らかに運動方向判断のコントラスト特性が異なる。3f 刺激においては、3f + 4f 縞のように特徴パターンがフーリエ成分と矛盾することがないため、反転が起こるとすれば1次運動検出器の反応を最もよく反映していると考えられる。ここで、3f + 4f のパターン運動方向に相当する 3f の反転運動が全く見られなかったことは、複合波形縞に

おける ISI によるパターン方向運動知覚は1次運動検出機構の反転応答とは直接関係がないことを示している。

しかし、3f 刺激の5フレーム提示で運動の反転知覚は生じなかったことは必ずしも1次検出器の反応が逆転していないことを示すわけではなく、1次検出器の反転応答より特徴追従機構の反応が優位であったことも考えられる。しかし、もしそうであるならば、さらに複雑な特徴パターンを持つ複合波形縞において1次の反転応答が主要な役割を果たすことはさらに考えにくくなる。いずれにしても、3f 要素に対する1次運動検出器の応答は3f + 4f 縞のパターン方向運動と直接対応するものではないと言える。

2フレーム提示の場合には弱いながらも3f 刺激における反転知覚の傾向が認められた。1次の検出器における反転応答は、複合縞の場合とは異なったものとして実際に生起し、それが知覚される運動方向に影響することは確かにあると言えるだろう。反転が強くない原因としては、刺激の空間周波数が比較的高いことが考えられる⁶⁾。しかし、この反転効果は、ISI の効果という点で類似しているが、3f + 4f 刺激におけるパターン方向運動とは異なる原因に基づくものとして分けて考えるべきである。

では、3f + 4f 複合波形縞におけるパターン運動の原因は何だろうか。ISI がある場合に両眼提示及び単眼提示のコントラスト応答がほぼ一致するものとなり、また、両眼提示条件では ISI によってコントラスト応答曲線が大きく変化しない点は重要である。両眼提示におけるパターン方向運動のもとになるメカニズムは ISI に関わらず一定であり、そのパターン方向応答は ISI = 0 ms でも起こることから、特定の ISI に依存するものではない。単眼提示の場合でも ISI がある場合にはほとんど同じ応答を示すことから、働いている機構は同一であり、それは本質的に両眼性と考えられる。この点から、パターン方向運動の原因は、主に単眼性と考えられるエネルギー検出型2次運動機構⁹⁾ではなく、より高次のものであることが示唆される。

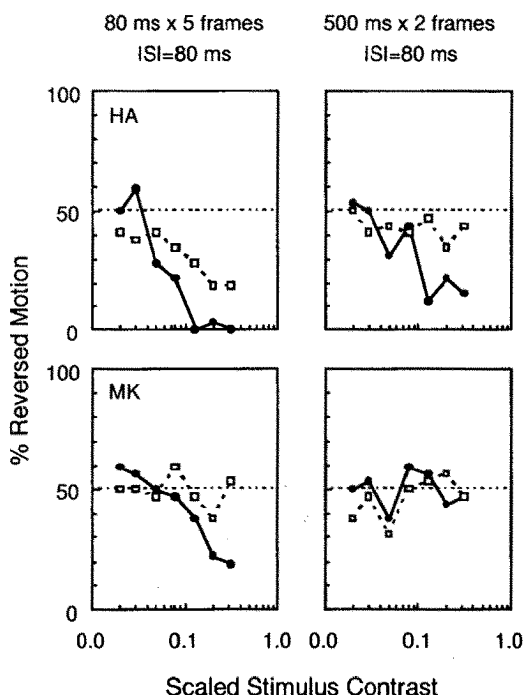


図3 3f 縞刺激の結果。実線は単眼提示、波線は両眼提示条件を示す。横軸は図2と対応するように変換してある。

3f + 4f 縞において、ISI = 0 ms の場合に、高コントラスト領域でフーリエ方向の運動知覚確率が大きく低下している点は重要である。おそらく、両眼性の機構は単眼提示で ISI = 0 ms の場合にも働いているが、そのコントラスト感度は1次機構に対して相対的に低いので中コントラストまでではフーリエ方向の運動が優位に知覚されると考えられる。1次機構の反応増加が飽和して応答が拮抗する高コントラスト領域では知覚される運動方向が曖昧になるのだろう。実際、高コントラスト刺激において被験者が運動透明視状況を観察することもあったが、そのことは2種類の機構の存在を支持する。

本研究の結果から直接は明らかになるとはいえないが、両眼性の運動視機構は特徴追従をもとにした検出機構である可能性が高い^{9, 10)}。著者の実験でも、3f + 4f 縞に3f相当の静止成分を加えてパターンを崩すことにより、運動方向知覚が不可能になることが示された¹¹⁾が、この結果は特徴点に依存した処理の存在を支持する。

5. おわりに

近年、特徴追従や注意に基づく比較的高次の運動視機構の存在について議論がなされるようになってきた。それは、古典的な仮現運動あるいはロングレンジ運動と呼ばれた運動知覚事態においても重要な役割を果たしている可能性が高い。しかしながら、そうした運動検出機構の研究に際して実験的にも理論的にも道具が十分でないという印象は拭えず、必ずしも説得的な議論がなされているとは限らない状況である。本研究はむしろ、そうした基礎的な研究の道具の探索の一步とも言える。いまだ枠組みが定まらない問題であるだけに、今後の一層の研究の進展が望まれる。

結果の一部は1996年ARVO annual meetingで発表された。

文 献

- 1) M. A. Georgeson and T. M. Shakleton: Monocular motion sensing, binocular motion perception. *Vision Research*, 29, 1511-1523, 1989.
- 2) M. A. Georgeson and M. G. Harris: The temporal range of motion sensing and motion perception. *Vision Research*, 30, 615-619, 1990.
- 3) S. Shioiri and P. Cavanagh: ISI produces reverse apparent motion. *Vision Research*, 30, 757-768, 1990.
- 4) J. J. Strout, A. Pantle and S. L. Mills: An energy model of interframe interval effects in single-step apparent motion. *Vision Research*, 34, 3223-3240, 1994.
- 5) R. O. Brown: Luminance nonlinearities and second-order stimuli. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 36, S51, 1995.
- 6) S. Nishida and T. Sato: Motion aftereffect with flickering test patterns reveals higher stages of motion processing. *Vision Research*, 35, 477-490, 1995.
- 7) 蘆田 宏: 視覚研究のための実験環境: IBM-PC 互換機における VESA 拡張 BIOS を利用したグラフィックスプログラミング. *VISION*, 8, 19-24, 1996.
- 8) A. Pantle and K. Turano: Visual resolution of motion ambiguity with periodic luminance- and contrast-domain stimuli. *Vision Research*, 32, 2093-2106, 1992.
- 9) Z.-L. Lu and G. Sperling: The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Research*, 35, 2697-2722, 1995.
- 10) Z.-L. Lu and G. Sperling: Attention-generated apparent motion. *Nature*, 377, 237-239, 1995.
- 11) H. Ashida: Perceived motion of compound gratings with ISI: evidence for feature based processing. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 37, S743, 1996.