

直交する錯覚成分によって生じる運動検出感度の向上

竹村 浩昌・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. 研究の背景

近年、初期の段階で要素運動の処理がなされ、後期の段階で複数の運動成分が統合された大域的な運動情報が処理されるという階層的な視覚運動情報処理モデルが心理物理実験¹⁾、および神経生理実験^{2,3)}の両面から幅広く支持されている。しかし、どの段階における処理情報が運動検出における感度を規定しているのかという問題は、いまだに明らかになっていない。本研究では、水平方向に呈示された運動成分の検出感度に対して、それとは直交する垂直方向の錯覚運動成分がどのような影響を与えるのかを心理物理実験により調べることを通じて、階層的な視覚運動情報処理と検出感度の関係について検討することを目的とした。

実験で用いる錯覚運動としては、刺激の周辺部が運動している際に、静止している中心部の刺激が周辺とは逆方向に運動して知覚される現象である「誘導運動 (Induced motion)^{4,5)}」を用いた。

2. 実験手続き

被験者は正常視力を持つ5名(うち3名はナイーブ)。視覚刺激は22インチCRTモニタ(リフレッシュレート75Hz)に呈示された。実験で用いた刺激は刺激の周辺部に垂直方向に運動する正弦波縞、中心部に水平方向に運動するガボールパッチを呈示したもので、中心部の刺激サイズは7.5°(ガボールパッチの標準偏差は

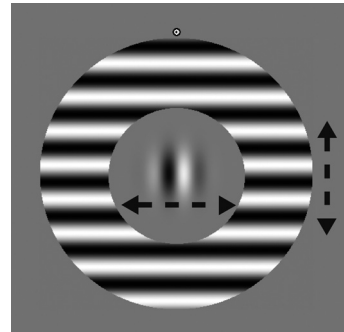


図1 実験で呈示された刺激。

2.58°), 周辺部の刺激サイズは15°であった(図1)。周辺刺激、中心刺激ともに、空間周波数は0.53 cycles/degであった。注視点は刺激周辺部から8°上方に呈示された。観察距離は50cmであった。

3. 実験1: 運動方向マッチング

刺激の周辺部が垂直方向に運動することにより、中心部には垂直方向の誘導運動成分が発生すると考えられる。運動検出感度の測定に先立ち、実際に中心部の刺激がどちらの方向に運動して知覚されたのかを方向マッチング法を用いて調べた。中心刺激が水平方向から何度垂直方向へバイアスされた方向に動いて知覚されたかを求めると、周辺刺激が静止する条件では水平方向への知覚が生じるが(中心刺激速度0.05Hz:0.2°, 0.025Hz:0.7°, 0.0125Hz:0.7°, 値はすべて5名のデータから求められた中央値)、周辺刺激が0.3Hzで運動する条件では斜め方向への知覚が生じ(中心刺激速度0.05Hz:19°, 0.025Hz:25.9°, 0.0125Hz:41.1°), 周辺刺激速

度が速くなると (2.34 Hz) 垂直方向に近い運動知覚が生じる (中心刺激速度 0.05 Hz : 53°, 0.025 Hz : 68.9°, 0.0125 Hz : 74.4°).

以上の結果は周辺刺激による錯覚成分と物理的な運動成分が統合されることを示した先行研究と一致し^{6,7)}, 複数の運動成分が統合される後期段階の処理の結果であると考えられる. 縦縞のガボールパッチは理論上運動方向が一意に定まらない「窓問題 (aperture problem)⁸⁾」を有する刺激であり, 垂直方向にバイアスされた運動方向の知覚は窓問題の解決過程に誘導運動が影響することによって生じたという解釈も考えられる.

4. 実験 2 : 運動検出感度

直交する誘導運動が運動検出感度に与える影響について検討するため, 二肢強制選択課題 (左 vs. 右) を行い, 条件間でその成績を比較した. 実験条件は周辺が運動する条件 (周辺運動速度は 2.34 Hz から 0.01 Hz まで 9 段階), 周辺が静止する条件であった. それぞれの条件において, 刺激の中心部には 0.025 Hz または 0.0125 Hz で左もしくは右に運動するガボールパッチが呈示された. 実験 1 の結果から, 周辺運動速度が速くなるに従って中心部の運動は垂直方向にバイアスされて知覚されると考えられるが, 中心部に呈示される刺激の物理的な運動速度は条件間で不変であり, また垂直方向に運動する周辺刺激や錯覚成分そのものは課題で問われている方向と直交するため課題と無関連である.

実験 2 の結果を図 2 に示す. 周辺速度が速い条件では, 周辺が静止する条件と比べて運動検出成績が悪くなる傾向がみられた. 一方, 周辺運動速度がやや遅い条件において, 運動検出成績がむしろ向上するという対照的な結果が得られた. 周辺が静止する条件は, 従来運動検出感度が最も良くなると考えられていた条件であり (「相対運動」)^{9,10)}, この条件よりも検出感度が良くなる現象は従来の知見では説明できない.

加えて, 刺激の周辺部に時間周波数成分は含むが誘導運動を発生させない位相反転縞 (counter-

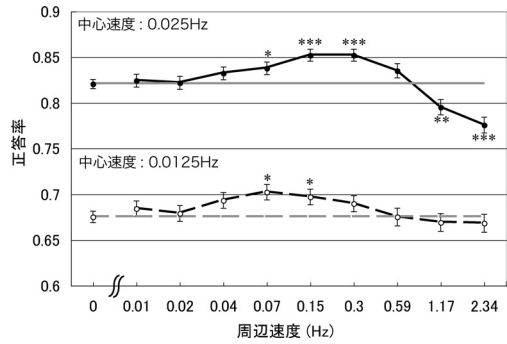


図 2 実験 2 の結果 ($n=5$). 正答率を周辺速度条件ごとにプロットした. 実線は周辺が静止する条件における正答率を, 曲線は周辺が運動する条件における正答率を表す. エラーバーは標準誤差を表し, アスタリスクは周辺が静止する条件と運動する条件の間で統計的に有意な差が見られた条件を表す (two-tailed Z test: *, $p < .05$; **, $p < .01$; ***, $p < .001$).

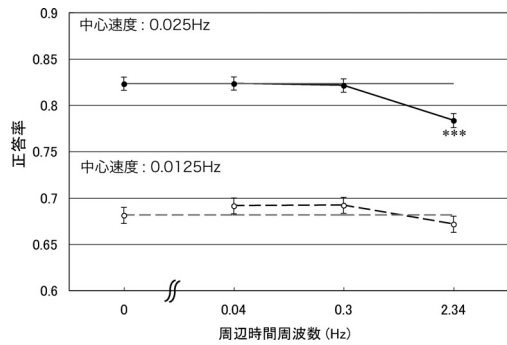


図 3 位相反転縞を用いた追加実験の結果 ($n=5$). 横軸は周辺部の刺激の時間周波数を表し, 他の表記は図 2 と同一である.

phase flicker) を呈示し, 同様の実験を追試した結果, 図 3 にみられるように検出感度が低下する傾向は追試されたものの, 検出感度が向上する傾向はみられないという結果が得られた.

5. 総合考察

位相反転縞を用いた追加実験の結果から, 周辺速度が速い条件における運動検出感度の結果は刺激周辺部の時間周波数成分の影響であると考えられ, 周辺刺激の時間周波数成分により知覚される刺激のコントラストが低下する効果¹¹⁾などと関連がある現象であると考えられる. し

かし一方で、実験2でみられた運動検出感度の向上は、周辺の時間周波数成分の影響では説明できず、またブラッド刺激を用いた先行研究¹²⁾と異なり特徴追跡などのメカニズムでも説明できないため、周辺の速度成分によって生じる誘導運動による効果であるといえる。このことはすなわち、運動検出感度の向上が水平方向の運動成分と垂直方向の錯覚成分が統合されることによって生じる現象であることを意味し、複数の運動成分が統合される後期の処理段階の情報が運動検出における感度を定めているということを示唆する。

運動検出感度が向上した原因としては、速度の表現と運動方向の表現という2つの異なる情報表現、およびそれに対する処理機構の相互作用が挙げられる。周辺が静止する条件では、運動速度が遅いため運動が検出できない一方で、周辺が非常に速い条件では、周辺の時間周波数成分の影響で検出成績が低下する。もしそのような効果がなかったとしても、運動方向が極端に垂直方向にバイアスされてしまうと、水平方向の運動検出はむしろできなくなってしまう。周辺が適度な速度で運動している条件においては、速度および運動方向の両者が課題に対して適切な状態となるために、運動検出感度が向上するというモデルが考えられる。これに関しては、従来の神経生理実験に基づくより詳細な神経回路モデルも提案されている¹³⁾。

本研究の結果は、それ自体は知覚に昇らない初期の知覚処理段階における表現が、他の情報と統合されることによって知覚可能となるということを示唆している。このことは、ヒトの視覚系においては初期の処理段階において実際の知覚像よりも細かい情報が多く表象されており、適切な条件を設定することによって、それらの情報を利用できるようになることを示唆する。本研究のアプローチによって、視覚系における運動情報処理のメカニズムが明らかになるばかりでなく、そのような情報を利用することによる感度の向上を生じさせることができる。今後の検討課題としては、異なる錯覚現象において

も同様の効果がみられるかを確認することが挙げられ、それに関してはすでに運動残効を用いた実験において類似した結果が得られている¹⁴⁾。

文 献

- 1) E. H. Adelson and J. A. Movshon: Phenomenal coherence of moving visual patterns. *Nature*, **300**, 523–525, 1982.
- 2) H. R. Rodman and T. D. Albright: Single-unit analysis of pattern-motion selective properties in the middle temporal visual area (MT). *Experimental Brain Research*, **75**, 53–64, 1989.
- 3) A. C. Huk and D. J. Heeger: Pattern-motion responses in human visual cortex. *Nature Neuroscience*, **5**, 72–75, 2002.
- 4) L. Duncker: Über induzierte Bewegung. *Psychologische Forschung*, **12**, 180–259, 1929. In W. D. Ellis (eds. & trans.): *Source Book of Gestalt Psychology*. Kegan Paul, Trench, Trubner & Co., London, 161–172, 1950.
- 5) A. H. Reinhardt-Rutland: Induced movement in the visual modality: an overview. *Psychological Bulletin*, **103**, 57–71, 1988.
- 6) W. C. Gogel: Induced motion as a function of the speed of the inducing object, measured by means of two methods. *Perception*, **8**, 255–262, 1979.
- 7) J. Kim and H. R. Wilson: Motion integration over space: integration of the center and surround motion. *Vision Research*, **37**, 991–1005, 1997.
- 8) H. Hildreth: *The Measurement of Visual Motion*. MIT Press, Cambridge, MA, 1984.
- 9) C. W. Tyler and J. Torres: Frequency response characteristics for sinusoidal movement in the fovea and periphery. *Perception & Psychophysics*, **12**, 232–236, 1972.
- 10) I. Murakami: Correlations between fixation stability and visual motion sensitivity. *Vision Research*, **44**, 751–761, 2004.
- 11) T. Takeuchi and K. K. De Valois: Modulation of

- perceived contrast by a moving surround. *Vision Research*, **40**, 2697–2709, 2000.
- 12) A. M. Derrington and D. R. Badcock: Two-stage analysis of the motion of 2-dimensional patterns, what is the first stage? *Vision Research*, **32**, 691–698, 1992.
- 13) 田嶋達裕, 竹村浩昌, 村上郁也, 岡田真人: 誘導運動による運動検出感度の向上と低下を説明する神経回路モデル. 信学技報, **108** (383), 95–100 (NC-2008-99), 2009.
- 14) H. Takemura and I. Murakami: Enhancement of motion detection sensitivity by orthogonal illusory motion. *Society for Neuroscience Annual Meeting Abstract*, 2009.