

運動情報と空間パターン情報の相互作用

西田 眞也

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 人間情報部 視聴覚情報研究グループ

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

1. はじめに

動きの見えは直接の感覚なのか、位置や形の変化から間接的に推論されたものか。この古典的な運動視の問題に対し、知覚心理学の先駆者達は仮現運動や運動残効といった現象に基づいて運動が直接の感覚であるという結論を導き出した¹⁾。さらに、運動方向に選択性を持った細胞の発見²⁾をきっかけに、MT/V5野を中心とする運動情報処理の経路の解析が進み^{3,4)}、他方で、運動視機能に選択的な障害を受けた脳損傷患者の存在が広く知られるようになる⁵⁾、脳内には運動情報を専門的に処理するモジュールがあって、位置や形といった空間パターンを見るモジュールとは独立しているという見方が一般的になった。

しかし、じっくり考え直してみると、運動と空間パターンの分離処理という話がそう単純でないことに気付く。そもそも、運動は空間パターンの時間変化であり、厳密に言えば、空間パターン処理なしに運動の検出は不可能である。運動と空間パターンのどちらの処理の範疇に入るのか区別が難しい現象もいくつかある。また、運動情報処理の様々な段階で、空間パターン情報と相互作用することが知られている。

2. 運動検出とパターン処理

運動検出のメカニズムには大きく分けて二種類あることが古くから指摘されている^{6,7)}。一方は、画像から直接運動を取り出すメカニズムであり、他方は空間パターンをまず分析

し、そこから得られた特徴の移動に基づいて運動を検出するメカニズムである。それぞれの名称や、どこに境界を置くかについては議論の別れるところだが、ここでは便宜上、前者をタイプA、後者をタイプBと呼ぶことにする。

運動エネルギーモデル¹⁰⁾に代表される一次(輝度)運動の検出メカニズムや、その前に非線形の前処理をつけた二次(コントラスト変調等)運動検出メカニズムは¹¹⁾、通常タイプAに分類される。タイプBのメカニズムは、タイプAでは説明できない運動(例えば一方がコントラスト変調、他方が両眼視差といった全く異なる属性で定義される刺激要素の間で生じる仮現運動)の説明に登場する^{12,13)}、それ以外の運動の知覚においても、タイプAとともに関与しているものと考えられる。このタイプの運動検出メカニズムは、空間パターン処理の出力が運動処理系に入力されるという運動/パターン相互作用の一つの例である。

一方、タイプAについても、空間パターン処理と全く無関係に運動検出が行われているとは言えない。多くの運動検出器のモデルが、図1に示すように、特定の方位、空間周波数に応答するような空間フィルターを備えている^{10,14)}。その理由の一つは、オリジナルのReichardt型の運動検出器¹⁵⁾のように空間フィルターが無いと、運動が正しく検出できないからである¹⁴⁾。実際に測定された運動方向選択的な細胞の受容野も、モデルと同じく、特

定の方位，空間周波数に応答するような構造を示している^{16,17}。また，これまで運動処理とは無関係と考えられてきた小細胞系の細胞からの入力，運動方向選択性を作り出すのに重要な役割をしていることが最近明らかになった¹⁸。つまり，タイプAを含めた運動検出一般において，空間パターン処理の出力が運動処理系に入力されるという構造が存在すると考えた方がよい。

そもそも空間パターンのない様な画像に運動は存在せず，空間パターンが時間的に変化するところに運動が生じる。運動処理がその出発点から空間パターン処理と切り離せない関係にあるのは当然のことなのである。

3. 運動するパターンの分析

空間パターン処理というと，どうしても静止した物体の形状処理などを思い浮かべてしまうが，物体が相当な速度で運動していても，それがどういう形状なのかを知覚することができる。このような運動物体の空間パターン処理は「だれ」が担当しているのだろうか。運動と空間パターンの分離処理説に従えば，運動情報の処理には関与せず，かつ高

い時間周波数に応答できるメカニズムが運動パターン処理の主役ということになる。しかし，もう一つの有力な可能性がある。

前節に述べたように，(タイプAの)運動検出器は運動方向の他に方位や空間周波数に対する選択性を持つ。これは運動を正しく検出するためのものであると同時に，このメカニズムが運動対象の空間パターンの分析に利用可能であることも意味している。つまり，原理的には，運動検出器(もしくは運動方向選択的なメカニズム)の出力のパターンから，運動刺激の傾きや大きさを推定することができるのである。

このような運動検出器の二重機能説をとると，いくつかの運動視現象がうまく説明できる¹⁹。その一つはモーションブラー(運動によるぼけ)²⁰である。光点をどんなに瞬間提示しても，我々には100ミリ秒のオーダーで刺激が持続しているように見える。この知覚的持続現象から考えると，光点を運動させた時にかなりの大きさのモーションブラーが生じることが予測される。しかし，実際に測定したブラーの量(軌跡の長さ)は予測よりはるかに小さくなる。このブラー解消現象に関する説明の一つは，運動刺激の検出に適した運動方向選択的な細胞が時空間で傾いた受容野を持っているが，そのような受容野で運動刺激を「見る」とブラーは生じない，というものである。

運動検出器の二重機能説を支持するもう一つの現象は，運動による時空間補完である¹⁹。縦棒を横方向に一定の距離連続的にシフトさせると運動して見える。その縦棒の真下に，同じような縦棒の仮現運動系列だが，各位置で棒の現れるタイミングをわずかに遅らせたものを提示する。すると，時間の遅れが空間のずれに変換され，上の棒が下の棒より運動方向にずれているように知覚される。この現象は空間パターンが運動軌道に沿って補完されることを示唆している。このような補完が，運動検出器の時空間で傾いた受容野に

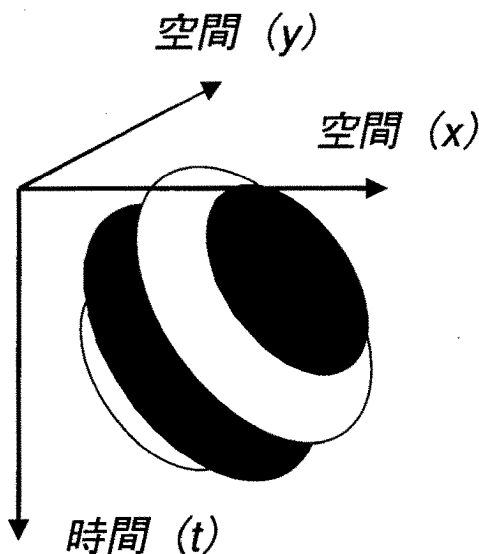


図1 代表的な運動検出器の受容野。時空間で傾き，空間周波数と方位に選択性を持つ。

よって実現されている可能性がある。

さて、以上二つの例は、運動検出器が空間パターン分析に用いられている可能性を示唆するものだが、いずれも間接的な証拠に過ぎない。実際、モーションブラー解消は、ドット間で生じる側抑制が原因であるとする説もある^{21, 22)}。

運動検出器の二重機能説の妥当性をもっと直接的に検討しようと、我々は大きさ残効に対する運動方向選択性を検討した²³⁾。大きさ残効とは、ある空間周波数の格子縞に順応した後、それより高い空間周波数はより高く、低いものはより低く知覚されるという現象である²⁴⁾。この現象の一般的な説明は、空間周波数の見えを決定する空間周波数チャンネルの興奮のパターンが、選択的順応の結果、順応周波数から離れる方向にシフトするというものである。この説明に従えば、もし、大きさ現象が運動方向選択性を示せば、つまり、順応刺激とテスト刺激の運動方向が一致する時により強い残効が得られるならば、空間周波数の知覚を決定するチャンネルが運動方向選択性を持っていることになる。これは運動検出器が空間パターン分析に用いられていることの直接的な証拠となりうる。

しかし、実験の結果、格子縞が低空間周波数/高時間周波数のとき多少の選択性が見られたものの、その他の条件では、運動方向は大きさ残効にほとんど影響を与えないことが明らかになった。このことは、運動格子の空間周波数の知覚に関与するメカニズムは、運動方向選択的でない、またはそうであってもその選択性は非常に弱いことを意味している。運動検出器の二重機能説よりは、運動と空間パターンの分離処理説に有利な結果である。

しかし、この結果だけから二重機能説を否定するのは多少早急過ぎるかもしれない。動くパターンの分析は非常に複雑で、興味深い問題がいくつも残されている。モーションブラーが何らかのメカニズムで押さえられてい

ることは先に述べた。さらに、運動する正弦波縞の空間周波数は、実際より高く見える^{25, 26)}。また、なだらかな輝度勾配がより急峻に知覚され、正弦波が矩形波に近い見えを示す^{27, 28)}。これらの現象は、我々の視覚系が、ブラーを押さえるだけではなく、動きによって失われる画像の鮮明さを積極的に復元しようとしていることを示唆している。その背後のメカニズムは、運動処理と切り離された空間パターン処理という枠組みでは説明できないように思える。

4. 運動情報の空間パターン知覚への影響

これまでは運動情報とパターン情報の処理の境界を問題にしてきたが、次に別個に処理された運動信号とパターン信号の間の相互作用について考える。

運動は位置や傾き、形状といった空間パターンの時間変化によって生じる。物理的な世界では、この関係は単純明快である。単位時間あたりの位置の移動量が運動速度であり、逆に速度と時間が与えられれば移動量が分かる。しかし、「見え」の世界では、脳内で運動と空間パターンが別個に処理されているため、この関係は必ずしも成り立たない。時間変化しない空間パターンが眼前にあり、それが運動しているという信号が脳内に発生するという矛盾した状況が起こりうる。その典型的な例が、「同じ方向の運動をしばらく見続けると、物理的に止まっているものが反対方向に動いて見える」という運動残効である。

運動残効において物理的に静止している空間パターンの位置は変化して見えるのか、見えないのか。これまでの常識は、変化しないということであった²⁹⁾。そしてこのことは、別々に処理された運動情報と位置情報が影響し合うことなく最終的な知覚に至ることを意味する、と考えられてきた。しかし、実際に測定してみると、位置ずれが知覚されるのである。このことを我々が最近行った研究³⁰⁾を

例に説明する。

用いた刺激は風車図形で、順応時には回転し、テスト時は静止する(図2)。運動残効は、順応時とは反対方向の回転として知覚される。この時テスト風車が垂直方位に提示されていても、残効の方向に多少傾いて見える。

みかけの方位のずれの量を時間とともに測定すると、テスト図形を見た直後の数秒間、まるで本当に風車が回転しているように方位のずれが次第に大きくなっていく。ただし、

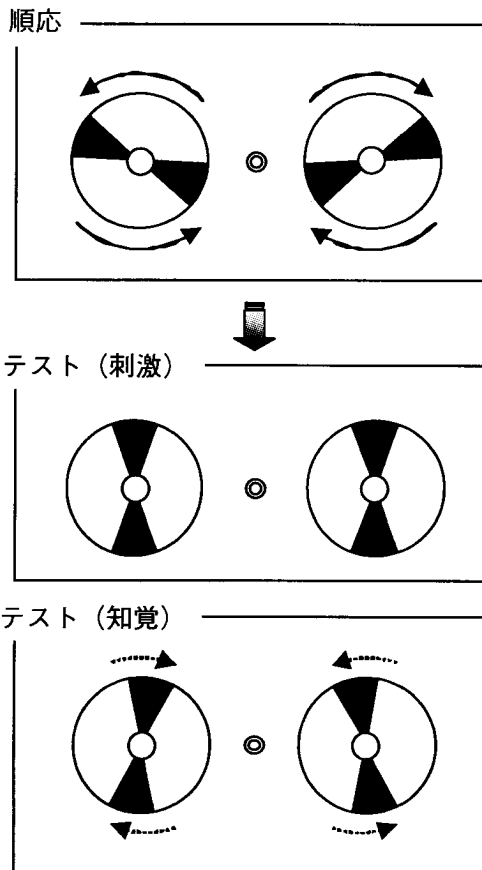


図2 運動残効による傾きの誘導。はじめに、中央の小円を見つめたまま、反対方向に回転する二つの「風車図形」を十秒程度観察する。次に垂直方位で静止した風車図形が提示される。このテスト風車は、「運動残効」によって、今までとは逆方向に回転して見えると同時に、回転して見える方向に風車が傾いて「ハ」の字型に見える。

その速度は実際に知覚されている運動残効の速度の1割に満たない遅いものである。

テスト図形提示開始から数秒後、みかけの方位のずれは徐々に減少し始める。これは、運動残効が時間の経過とともに弱まっていくためだが、面白いことに方位のずれは運動残効が見えなくなった後もしばらく残る。この長い持続時間と上記のテスト提示直後の方位ずれの増加は、運動の情報から位置変化を推定する際に、過去の運動の影響を時間的に積分している可能性を示唆している。ただ、同時に矛盾するパターン信号が正しい方位に引き戻そうとするため、時間とともに方位ずれは減少する。テスト刺激の位相を反転させて時間的な不連続性を導入すると、積分効果だけをなくすることができる。

また、運動残効が見える方向と反対方向に風車を回転させると、実際には動いているのに、止まって見える状態を作り出すことができる。この状態では方位のずれは見られない。つまり、実際に運動するとその方向に方位がずれて見え³¹⁻³³⁾、運動残効でも方位がずれて見え、その二つを運動について相殺すると、位置ずれも相殺されてなくなる。これは、実運動、残効に関わらず、脳内の運動信号そのものが方位のずれを生み出す原因であることを意味している。

このように運動信号が位置の知覚に影響し、傾きを誘導する。もともと運動は位置の時間微分であり、視覚系が運動情報を位置の推定に利用していることは驚くべきことではない。しかし、脳内の処理経路を考えると、この結果の意味するところは深長である。

5. その他の運動/空間パターン相互作用

複数の孤立刺激要素が存在する画像間で仮現運動が生じるとき、視覚系はどの要素がどの要素に対応するかを決定しなければならない。これを仮現運動の対応問題といい³⁴⁾、対応要素間の方位³⁵⁾、空間周波数³⁶⁾、形状³⁷⁾の類似性が運動対応に影響することが報告されて

いる。これも、空間パターン処理が運動処理へ影響している一つの例である。ただ、その実体は、形態システムから運動システムへの相互作用よりは、運動視検出器の比較的単純な前処理である可能性が高い³⁸⁻⁴¹⁾。

4節で紹介した例とは逆に、空間パターンに対する知覚が運動知覚に影響する例もある。方位の異なる二つの格子縞を重ね、その交差部の明るさを調整すると、透明な縞が重なっているように見える条件が見つかる。そのような条件で縞を運動させると、通常は一つにまとまって運動して見える二つの縞がバラバラに見えるようになる⁴²⁾。また、両眼視差によって運動領域の輪郭が運動領域に属さない（つまり運動領域を遮蔽する輪郭である）ように知覚されるときには、輪郭方向に運動が見えるというバーバーポール錯視が起こりにくくなる⁴³⁾。これらの例は、局所的に検出された運動を統合して窓問題を解決する際に、運動以外の空間情報も総合的に考慮するような処理が行われていることを示唆している。

運動処理から空間パターン処理へ入力する例が運動輪郭である。他の属性に違いがなくても運動方向や速度の違う領域の境界に輪郭が知覚される。運動輪郭に対する方位弁別閾や副尺視力は、見えの明瞭さ等の要因を等しくした輝度輪郭とほとんど変わらない⁴⁴⁻⁴⁶⁾。このことは、運動視システムで取り出された運動輪郭が、空間パターン処理において輝度輪郭などと同様に扱われていることを示唆している。また、「運動からの3次元構造復元」も運動処理から空間パターン処理へ入力する例である。

6. 終わりに

ここでは、明るさ、位置、傾き、形、3次元の空間構造など、モノクロ静止画像から得られるすべての属性を指して「空間パターン情報」という言葉を使っている。しかし、これはあまりに大掴みな用法かもしれない。特

に、位置や3次元構造のような「大細胞的」「where システム的」「頭頂葉的」属性と、形のような「小細胞的」「what システム的」「側頭葉的」属性をまとめてしまうことは筆者自身も多少抵抗感がある。

しかし、逆に、位置と形を分離して考える十分な根拠はあるのだろうか。位置の時間的な変化が運動になるように、位置の空間的な変化が傾きや形になるのである。位置情報の処理とはどういうものか。この難問の答えを出さねば、運動情報と空間パターン情報の相互作用の本質を理解することはできないかもしれない。

謝辞 日頃から研究をサポートしていただいている NTT コミュニケーション科学研究所、内藤誠一郎人間情報部長に感謝します。

文 献

- 1) K. Nakayama: Biological image motion processing: A review. *Vision Research* 25, 625-660, 1985.
- 2) H. B. Barlow and R. M. Hill: Evidence for a physiological explanation of the Waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*, 200, 1345-1347, 1963.
- 3) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, 7, 3416-3466, 1987.
- 4) S. Zeki: 脳と視覚. *日経サイエンス*, 22, 38-49, 1992.
- 5) T. D. Albright: Cortical processing of visual motion. *F. A. Miles and J. Wallman (eds): Visual Motion and Its Role in the Stabilization of Gaze*. 177-201, Elsevier, London, 1993.
- 6) R. B. H. Tootell, J. B. Reppas, K. K. Kwong and R. Malach: Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 15, 3215-3230, 1995.
- 7) J. Zihl, D. Von Cramon and N. Mai: Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, 106, 313-340, 1983.
- 8) O. Braddick: A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, 14, 519-527, 1974.
- 9) S. M. Anstis: The perception of apparent motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of*

- London B*, 290, 153-168, 1980.
- 10) 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.
 - 11) 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, 1986-2007, 1988.
 - 12) P. Cavanagh and G. Mather: Motion: The long and short of it. *Spatial Vision*, 4, 103-129, 1989.
 - 13) P. Cavanagh: There then but here now. *Spatial Vision*, 7, 88, 1993.
 - 14) J. P. H. van Santen and G. Sperling: Elaborated Reichardt detectors. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 300-321, 1985.
 - 15) W. Reichardt: Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system. *W. A. Rosenblith (ed): Sensory communication*. MIT Press, Cambridge, 1961.
 - 16) J. McLean and L. A. Palmer: Contribution of linear spatiotemporal receptive field structure to velocity selectivity of simple cells in area 17 of the cat. *Vision Research*, 29, 675-679, 1989.
 - 17) G. C. DeAngelis, I. Ohzawa and R. D. Freeman: Spatiotemporal Organization of simple-cell receptive fields in the cat's striate cortex. I. General Characteristics and postnatal development. *Journal of Neurophysiology*, 69, 1091-1117, 1993.
 - 18) R. L. De Valois and N. P. Cottaris: Inputs to directionally selective simple cells in macaque striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 95, 14488-14493, 1998.
 - 19) D. C. Burr, J. Ross and M. C. Morrone: Seeing objects in motion. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 227, 249-265, 1986.
 - 20) D. C. Burr: Motion smear. *Nature*, 284, 164-165, 1980.
 - 21) J. H. Hogben and V. di Lollo: Suppression of visible persistence in apparent motion. *Perception and Psychophysics*, 38, 450-460, 1985.
 - 22) S. Chen and H. Ogmen: A target in real motion appears blurred in the absence of other proximal moving targets. *Vision Research*, 35, 2315-2328, 1995.
 - 23) S. Nishida, I. Motoyoshi and T. Takeuchi: Is the size aftereffect direction selective? *Vision Research*, 39, In press, 1999.
 - 24) C. Blakemore and P. Sutton: Size adaptation: A new aftereffect. *Science*, 166, 245-247, 1969.
 - 25) A. Parker: Shifts in perceived periodicity induced by temporal modulation and their influence on the spatial frequency tuning of two aftereffects. *Vision Research*, 21, 1739-1747, 1981.
 - 26) A. Parker: The effects of temporal modulation on the perceived spatial structure of sine-wave gratings. *Perception*, 12, 663-682, 1983.
 - 27) V. S. Ramachandran, V. M. Rao and T. R. Vidyasagar: Sharpness constancy during movement perception: Short note. *Perception*, 3, 97-98, 1974.
 - 28) P. J. Bex, G. K. Edgar and A. T. Smith: Sharpening of drifting, blurred images. *Vision Research*, 35, 2539-2546, 1995.
 - 29) R. L. Gregory: *Eye and Brain*. McGraw-Hill, New York, 1966.
 - 30) S. y. Nishida and A. Johnston: Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern. *Nature*, 397, 610-612, 1999.
 - 31) V. S. Ramachandran and S. M. Anstis: Illusory displacement of equiluminous kinetic edges. *Perception*, 19, 611-616, 1990.
 - 32) R. L. De Valois and K. K. De Valois: Vernier acuity with stationary moving Gabors. *Vision Research*, 31, 1619-1626, 1991.
 - 33) R. Nijhawan: Motion extrapolation in catching. *Nature*, 370, 256-267, 1994.
 - 34) S. Ullman: *The interpretation of visual motion*. MIT Press, Cambridge, 1979.
 - 35) S. Ullman: The effect of similarity between line segments on the correspondence strength in apparent motion. *Perception*, 9, 617-626, 1980.
 - 36) M. Green: Color correspondence in apparent motion. *Perception and Psychophysics*, 45, 15-20, 1989.
 - 37) S. Shechter, S. Hochstein and P. Hillman: Shape similarity and distance disparity as apparent motion correspondence cues. *Vision Research*, 28, 1013-1021, 1988.
 - 38) S. Nishida and T. Takeuchi: The effects of luminance on affinity of apparent motion. *Vision Research*, 30, 709-721, 1990.
 - 39) S. Nishida, Y. Ohtani and Y. Ejima: Inhibitory interaction in a split/fusion apparent motion: Lack of spatial-frequency selectivity. *Vision Research*, 32, 1523-1534, 1992.
 - 40) P. Werkhoven, H. P. Snippe and J. J. Koenderink: Effects of element orientation on apparent motion

- perception. *Perception and Psychophysics*, 47, 509-525, 1990.
- 41) P. Werkhoven, G. Sperling and C. Chubb: The dimensionality of texture-defined motion: A single channel theory. *Vision Research*, 33, 463-485, 1993.
- 42) G. R. Stoner, T. D. Albright and V. S. Ramachandran: Transparency and coherence in human motion perception. *Nature*, 344, 153-155, 1990.
- 43) S. Shimojo, G. H. Silverman and K. Nakayama: Occlusion and the solution to the aperture problem. *Vision Research*, 29, 619-626, 1989.
- 44) D. Regan: Form from motion parallax and form from luminance contrast: Vernier discrimination. *Spatial Vision*, 1, 305-318, 1986.
- 45) D. Regan: Orientation discrimination for objects defined by relative motion and objects defined by luminance contrast. *Vision Research*, 29, 1389-1400, 1989.
- 46) T. Banton and D. M. Levi: Spatial localization of motion-defined and luminance-defined contours. *Vision Research*, 33, 2225-2237, 1993.