

視覚運動検出モデルと最近の動向

蘆田 宏

京都大学大学院 文学研究科
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

1. はじめに

網膜像における動きの検出は、いわゆる運動視にとどまらず広く視覚情報処理の基礎となる重要な問題である。1980年代までいくつかのすぐれたモデルが提案されたが、その後も少しずつ議論が続いている。

本稿では、視覚運動検出の入門編として各種検出モデルの基本概念を説明し、若干最近の話題にもふれることとしたい。詳細については原典の他多くの解説が存在するので、それらを参照していただきたい¹⁻³⁾。

なお、ここでいう「運動」は image motion すなわち単なる網膜像上の動きを指すこととする。著者自身、身体的運動の問題を扱うようになり、日本語、英語を問わず表現に困惑することが多くなったが、今のところ仕方がないだろうか。

2. 各種の運動検出モデル

2.1 相関検出

運動は対象が一定の時間 Δt をかけて距離 Δx を移動することだと考えると、それを検知するには、2点にセンサを置いて遅延回路を介してANDでつなげばよい(図1)。この原理に基づくモデルは、2点間の相関を計算するという意味で相関モデルと呼ばれる。Reichardtが⁴⁾ハエの網膜のモデルとして提案したのはこの形の検出機構で⁴⁾、反対方向への出力の差分を最終出力とした。ただし、本人は部分的に簡略化したものを「Reichardt型検出器」と呼ぶことを嫌ったという。

しかし、図1のように点入力を受ける検出器

には空間的エイリアスの問題が生じる。つまり、細かい繰り返しパタンが右へ動くのと、荒いパタンが左へ動くのを区別できない場合がある。それを避けるために、相関計算の前に空間的バンドパスフィルタを組み込み、時間フィルタについても改善したものがERD(改良型Reichardt検出器)である⁵⁾。出力においてERDは後述の運動エネルギーモデルと等価となるが、途中の表現は若干異なる。

2.2 時空間傾き検出

便宜上、左右や上下など1次元だけの運動を考えると、ある物体が位置を変えていく様子は図2のような時空間プロットとして表現できる。図において運動は斜め方向の線分として現れる。よって、平面上の方位検出器と同じように、興奮・抑制領域からなる時空間次元での傾き検出フィルタを用いて運動を検出することができる。

2.3 運動エネルギー

図2では、出力は入力の位相によって変動す

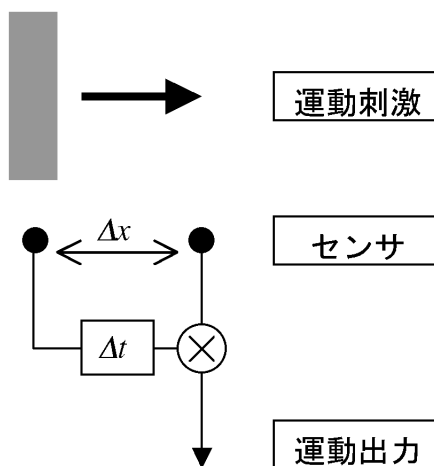


図1 相関型検出器の概念図。

る．そこで，位相を1/4ずらした2つのフィルタ (quadrature pair) の2乗和により位相依存性を排したものが運動エネルギーモデルである⁶⁾ (図4を参照)．運動エネルギーモデルでは，Reichardtのモデルと同様，逆方向の検出器の差分を運動信号とする (opponent-motion stage)．

運動エネルギーモデルが広く支持された理由として，生物学的に妥当と考えられる実現方法が具体的に提案されたことがあげられるだろう．空間的にはガボア関数を，時間的には一般的な双極性 (bi-phasic) インパルス応答関数を用いて傾きフィルタが構成され⁶⁾，応用が容易である．

2.4 勾配法

対象が時間 Δt 後に位置 Δx だけ動く場合，ご

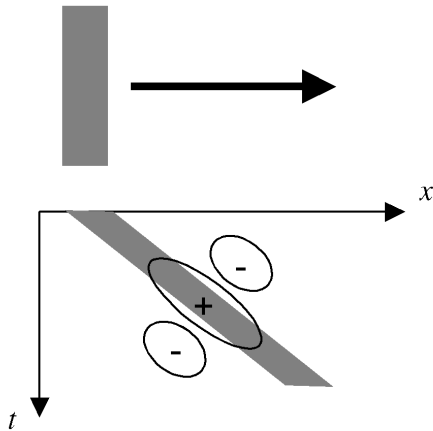


図2 時空間傾き検出．

く短い時間においては対象の明るさが変わらないとすると $I(x, t) = I(x + \Delta x, t + \Delta t)$ と表せる．これをテーラー展開して高次項を無視，さらに $\Delta x, \Delta t \rightarrow 0$ とすると

$$\frac{\partial I}{\partial x}v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0$$

が得られる．つまり，速度 v は画像の時間微分/空間微分として計算される (図3)．このように時空間的な勾配 (gradient) を用いる検出法を勾配法と呼ぶ．2次元的な運動にも同様の関係がなりたち，工学的なオプティカルフロー検出においてよく用いられる．

MarrとUllman⁷⁾は勾配法を用いたモデルを提案した．空間的に一様または不連続だと不都合なので，ラプラシアン・ガウシアンフィルタを用いてぼかすとともに輝度エッジを検出し，その付近で勾配計算を行なう．その後，運動エネルギーモデルの方が一般化した感があったが，Johnstonら⁸⁾は勾配法を応用して，先述の式では無視した高次微分項を含めたモデルを，生物学的に妥当なものとして提案している．

脳内での勾配計算の傍証として，一様かつ一方向への輝度変化への順応によって，その後に観察する空間的な輝度勾配刺激が動いて見えるという，一種の運動残効があげられる⁹⁾．順応刺激に空間的な方向性がないので多くの運動検出

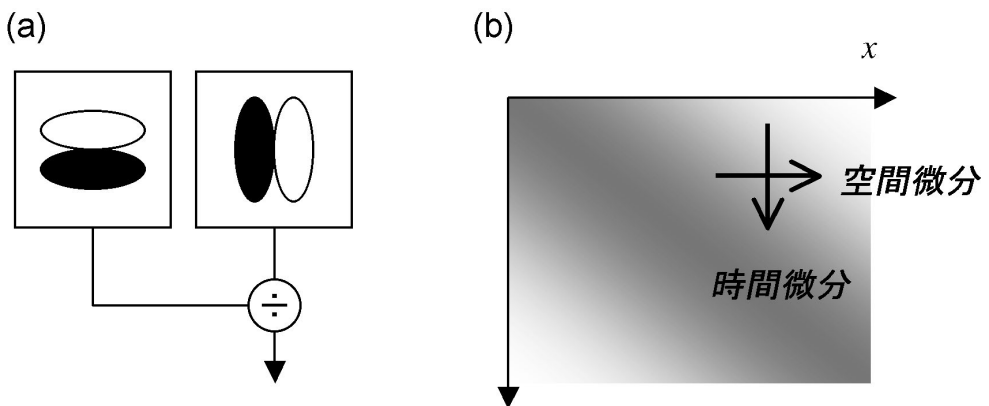


図3 (a) 勾配法モデルの概念図．(b) 時空間プロットにおける輝度勾配の様子．図の右上では空間微分が正で時間微分が負である．左下では時空間ともに極性が反転するので，除算の結果符号はは変わらず，計算される速度は一定である．

モデルでは説明しにくいですが、勾配法であれば、輝度の時間的変化が時間微分項の順応をもたらしたと考えると説明できる¹⁰⁾。

勾配法モデルは速度を量的に抽出できる。ただし、生体におけるそのような速度表現の存在は必ずしも明らかでない。また、安定した速度計算のために複数のフィルタ出力の統合が必要であるなら⁸⁾ 運動エネルギーから速度を計算する⁶⁾ より効率的ともいえないかもしれない。

2.5 勾配エネルギーモデル

勾配法モデルの神経による実現を考えると、運動エネルギーと大きな差はないともいえる。Georgeson¹⁰⁾ は、運動エネルギーモデルにおける時空間方位フィルタ部分を2次元ガウス関数の空間・時間微分を用いて構成した、ハイブリッド型ともいえるモデルを提案した。この修正により、運動エネルギーを静止エネルギーで割ることで速度表現が得られるようになった。

一方、Johnston¹¹⁾ は運動エネルギーモデルと勾配法モデルの類似点を強調する議論には否定的である。彼は、勾配法と運動エネルギーが等価だというのは、ハンバーガーを開いてチーズをのせればピザと同じだというようなものだという。実際、モデルのレベルによって、細部の表現の違いが大きな意味を持ちうるので、議論のレベルを明確にしないと混乱を生じるだろう。

2.6 非フーリエ運動の検出

コントラスト変調運動など、周波数次元で極在した準線形フィルタでは捉えられない運動刺激を非フーリエ運動と呼ぶ。一般に二次運動と呼ばれるものとはほぼ重なるが、二次運動は刺激の属性による定義であり、コントラスト反転運動のように一次刺激による非フーリエ運動もある。詳細は他に譲り^{1,2)}、ここでは上記のモデルとの関連のみ簡単に述べておく。

これまで、非線形な復調機構(整流など)を経てERDや運動エネルギー検出を行う独立した経路の存在を仮定するモデル¹²⁾ が有力視されてきた。しかし、勾配法モデルは直接ある種の非フーリエ運動を検出できる。Johnston⁸⁾ は、高次微分項を用いた勾配法モデルを提案し、別の検

出経路を想定する必要がないことを論じた。このモデルは、複雑さもあって広く支持されたとは言いがたい。しかし、Benton¹³⁾ は、勾配法でコントラスト変調運動が抽出しうることをより単純なモデルを用いて分析している。要するに、前処理なしでも運動検出過程そのものの非線形性(除算など)によってある種の非フーリエ運動を捉えることができる。

実験データから、どちらが正しいのかを判定することは難しい。最近では、二次/非フーリエ運動に関する研究にはひとところほどの隆盛は見られないが、この問題は運動検出の基本原理にかかわるので、今後も実験・理論両面での検討が必要であろう。

2.7 高次運動

古典的な仮現運動や長距離運動¹⁴⁾ のように、特徴点の抽出とその照合により動きを検知するという考え方は古くからあり、現在でもその可能性について多くの研究者が認めている。しかし、その検出原理の解明はあまり進んでいない。入力には特徴点などの高次の表現を用いるものの、検出原理そのものは大差ない可能性もある^{15,16)}。また、能動的な注意の移動が運動知覚を誘導するという考えも考えられる¹⁷⁾。今後、特に理論的な考察の進展が待たれる。

3. 運動コントラストと正規化

3.1 運動コントラスト

図4に示すように、運動エネルギーモデルでは、反対方向へのエネルギーの差分を計算する。左右方向のエネルギーを E_L 、 E_R とすると、差分としての運動エネルギーは $ME = E_L - E_R$ である。しかし、左右両方向にエネルギーが存在するときには、その総量を考慮したほうがよい指標となりうる。そこで、フリッカーエネルギー $FE = E_L + E_R$ を考え、運動コントラスト(motion contrast) $C_m = ME/FE$ を計算すると、運動方向弁別実験データをよく説明することができるという¹⁸⁾。運動対比現象とまぎらわしい用語であるが、輝度コントラストの計算と同型であると言いたいなら仕方がないだろうか。

3.2 運動コントラストと正規化

運動コントラストはコントラスト正規化¹⁹⁾，すなわち，ある細胞の反応ゲインは周囲の細胞の反応総量により調節されるという考え方に通じる．ただし，運動コントラストの場合，近傍の総量による正規化ではない．Rainvilleら²⁰⁾は，フリッカー刺激による側方マスクング実験を行い，方位，空間周波数，および(ある程度の)位置に選択的な正規化を行う運動コントラストがデータによく合うことを示した．フリッカー刺激が運動刺激と重なる場合にも同様であるという²¹⁾．

3.3 非フーリエ運動と運動コントラスト

準線形フィルタを用いる運動エネルギーモデルは非フーリエ運動を検出できないと考えられてきた．しかし，Benton²²⁾によると，先述の勾配エネルギーモデルにおいて，コントラスト変調運動に対して運動エネルギー ME は運動方向を示さないが，運動コントラスト C_m は速度成分を示すという．ただし，反対方向への速度がほぼ等しく現れる．この分析結果は一見不可解だが，コントラスト変調運動は運動残効を生起せず高変調深度でも方向判断が難しいことがあるという知見とは妙に符合するようにも思える．結論は今後の検討を待たねばならないが，運動

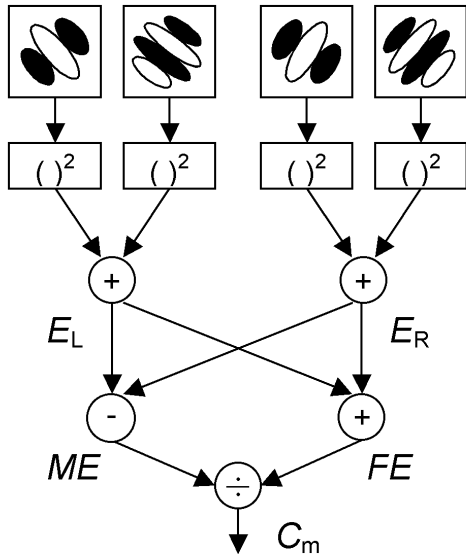


図4 運動エネルギー (ME) と運動コントラスト (C_m)．
 FE はフリッカーエネルギーを示す．

コントラストの幅広い可能性を示唆する点で興味深いといえるだろう．

4. おわりに

視覚運動検出の問題は，より複合的な問題を考える上での基礎となると同時に，それ自体まだ解明すべき問題を含んでいるように思われる．より包括的，一般的な理解のため，さらに研究を進める必要があるだろう．

文献

- 1) 日本視覚学会(編): 視覚情報処理ハンドブック．朝倉書店，2000．
- 2) 西田眞也: 運動視研究の最近の動向．*VISION*, 17, 1-7, 1995．
- 3) 佐藤隆夫: 運動視メカニズムの研究．齊藤秀昭，森晃 徳(編): 視覚認知と聴覚認知．6-19, 1999．
- 4) W. Reichardt: Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system. *W. Rosenblith (Ed.): Principles of sensory communication*. John Wiley & Sons, New York, 1961．
- 5) J. P. H. van Santen and G. Sperling: Elaborate Reichardt detectors. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 300-321, 1985．
- 6) 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．
- 7) D. Marr and S. Ullman: Directional selectivity and its use in early visual processing. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 211, 151-180, 1981．
- 8) A. Johnston, P.W. McOwan and H. Buxton: A computational model of the analysis of some first-order and second-order motion patterns by simple and complex cells. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 250, 297-306, 1992．
- 9) S. Anstis: Motion aftereffects from a motionless stimulus. *Perception*, 19, 301-306, 1990．
- 10) V. Bruce, M. P. R. Green and M. A. Georgeson: *Visual Perception*, 3rd edition (Chapter 8)．

- Psychology Press, Hove, 1996.
- 11) A. Johnston, C. W. G. Clifford, C. P. Benton and P. W. McOwan: Why correlation, energy and gradient models are not equivalent. *Vision Sciences Society 01*, **68**, 2001.
 - 12) 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.
 - 13) C. Benton and A. Johnston: A new approach to analyzing texture-defined motion. *Proceedings of the Royal Society of London B*, **268**, 2435-2443, 2001.
 - 14) O. J. Braddick: Low-level and high-level processes in apparent motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, **290**, 137-151.
 - 15) P. Cavanagh, M. Arguin and M. von Grunau: Interattribute apparent motion. *Vision Research*, **29**, 1197-1204, 1989.
 - 16) Z. L. Lu and G. Sperling: Three systems for visual motion perception. *Current Directions in Psychological Science*, **5**, 44-53, 1996.
 - 17) P. Cavanagh: Attention-based motion perception. *Science*, **257**, 1563-1565, 1992.
 - 18) M. A. Georgeson and N. E. Scott-Samuel: Motion contrast: a new metric for direction discrimination. *Vision Research*, **39**, 4393-402, 1999.
 - 19) D. J. Heeger: Normalization of cell responses in cat striate cortex. *Visual Neuroscience*, **9**, 181-197, 1992.
 - 20) S. J. Rainville, N.E. Scott-Samuel and W.L. Makous: The spatial properties of opponent-motion normalization. *Vision Research*, **42**, 1727-38, 2002.
 - 21) S. Rainville, N.E. Scott-Samuel and W.L. Makous: The spatial property of opponent-motion normalisation: lateral vs superposition masking. *Perception (Supplement)*, **31**, 37, 2002.
 - 22) C. P. Benton: A novel slant to second-order motion. *Perception (Supplement)*, **31**, 36, 2002.