

■S3 群 (脳・知能・人間) - 2 編 (感覚・知覚・認知の基礎)**6 章 運動視**

(執筆者：朝倉暢彦) [2008 年 8 月 受領]

■概要■

運動を知覚することは生体の視覚系の基本的な機能である。色覚や両眼立体視の機能を欠いた動物においてすら運動を知覚する基礎的な機能は存在している。運動の知覚は網膜上に与えられた画像の時空間変化パターンの処理から始まる。そして画像運動が検出され、様々な目的のために画像運動が解釈される。ここでは、この一連の処理過程がどのような原理で実現されているのかという計算論的視点を踏まえ、生体の運動視機能を概説する。

【本章の構成】

本章では、まず画像運動を検出する基礎メカニズムについて述べる (6-1 節)。そして、より洗練された画像運動の表現を得るための空間的統合の計算理論を解説する (6-2 節)。更に自己及び外界を理解するための画像運動の解釈の過程について述べる (6-3 節)。

■S3 群 - 2 編 - 6 章

6-1 画像運動の検出

(執筆者：朝倉暢彦) [2008年8月 受領]

外界の対象と観察者との相対運動により、観察される画像に動きがもたらされる。この画像運動の検出が生体の運動視機能の基礎である。この運動検出においては、(1) 動画像の時空間フィルタリング、及び(2) 画像内の特徴の継時的な対応づけのメカニズムが機能している。以下、順にその概要を述べる。

6-1-1 時空間フィルタリング

この方略の基本となる考えは、画像の運動を時空間における傾きとして捉えることにある(図 6・1)。ここでは簡単に画像上の特徴が一定速度で水平方向に動くような一次元の運動を考える。この場合、特徴の位置の時空間プロットは傾いた線分となり、その傾きが速度に対応する。この傾きは画像の明るさの変化から次のように求めることができる。まずこの特徴の水平位置の軌跡を時間 t の関数として $x(t)$ とし、その明るさ $I(x(t), t)$ が微小時間内で変化しないものとする。このとき I の全微分は 0 となるので次式が成り立つ。

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (6 \cdot 1)$$

ここで線分の速度 (dx/dt) は一定であるからこれを u とすれば

$$u = - \frac{(\partial I / \partial t)}{(\partial I / \partial x)} \quad (6 \cdot 2)$$

となり、画像の明るさの時間微分と空間微分の比から速度が求められることが分かる。この原理を基礎として速度を計算するモデルは勾配モデルと呼ばれ、時空間に方向選択性をもった傾き検出フィルタを用いて必要な計算を実装するモデルが提案されている¹⁾。

一方、画像の運動を周波数領域で検出することもできる。時刻 0 における画像の水平位置 x での明るさを $I_0(x)$ とすれば、上と同様に画像が速度 u で水平方向に運動する場合、任意の位置・時間における画像の明るさは $I_0(x-ut)$ と表される。このとき I_0 のフーリエ変換は $F_0(w_x)$ $\delta(uw_x + w_t)$ となる (w_x は空間周波数、 w_t は時間周波数、 $F_0(w_x)$ は $I_0(x)$ のフーリエ変換、 δ はディラックのデルタ関数)。これより、一次元運動のパワースペクトルは、周波数領域において原点を通る直線 $uw_x + w_t = 0$ にのみ存在し、その直線の傾きの大きさが運動の速度に対応することがわかる(図 6・1(c))。したがって、時空間周波数領域におけるパワースペクトルの分布から原点を通る直線を回帰することにより速度を求めることができる。この原理を基礎とし、パワースペクトルの分布を時空間帯域通過型フィルタを用いて計算するモデルが提案されており、運動エネルギーモデルと呼ばれている^{2,4)}。

運動エネルギーモデルでは、正弦波をガウス関数で変調したガボール関数状のフィルタがよく用いられる。これは一種の時空間傾き検出フィルタであり、勾配モデルで用いられるものとほぼ等価な出力が得られる。このような類似性から、どちらのモデルが生体の運動検出のモデルとして妥当であるかについては議論が分かれている。一方、時空間における傾きから速度を求めるという原理は両者で共通であり、その基礎となる時空間傾き検出フィルタに

ついては、初期視覚野における単純型細胞の時空間受容野との対応が指摘されている⁵⁾。また、複雑型細胞の応答が運動エネルギーを反映したものであることも示唆されている⁶⁾。

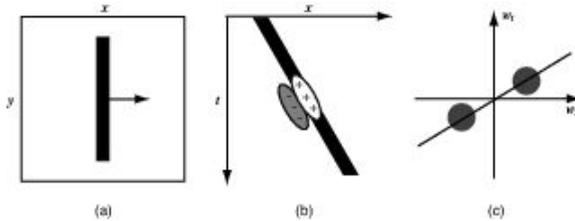


図 6・1 時空間の傾き

x, y は位置, t は時間, w_x と w_t はそれぞれ空間周波数と時間周波数. (a) 右方向に動く縦線分. (b) $x-t$ 平面上での時空間プロットと傾き検出フィルタ. (c) 時空間周波数領域での表現.

直線は時空間プロットの周波数スペクトル. 黒色の領域は傾き検出フィルタの周波数応答.

6-1-2 特徴マッチング

画像内の特徴の運動速度 u は、ある時間間隔 Δt において特徴が移動した距離 Δx を計算することで直接得ることができる ($u = \Delta x / \Delta t$)。この Δx は時間的に離れた画像間で対応する特徴の位置の変化であり、このような対応づけを確立する操作が特徴マッチングである。これは静止画像を時間間隔を空けて不連続に呈示する仮現運動事態での運動検出に直接適用することができる。ただし、仮現運動を連続時間での実運動をサンプリングしたものと捉えれば、時空間フィルタリングによっても運動を検出することは可能である。

運動検出における特徴マッチングと時空間フィルタリングの本質的な違いは、運動を検出するために用いられる画像の表現素にある。特徴マッチングでは、画像内における特徴の位置が運動検出に用いられる表現素である。したがって、運動検出に先立って対応づけのための特徴を同定し、その特徴の画像内での位置を明示的に表現しなければならない。一方、時空間フィルタリングでは、画像の明るさの局所的な時空間的变化に基づいて瞬時の速度を計算するため、特定の特徴を同定することや、その位置を表現することは必要ではない。先に述べたように、この明るさの時空間的变化は周波数領域において $uw_x + w_t = 0$ の拘束式を満たす。これは、空間周波数 w_x の成分が速度 u で運動することによって、局所的な明るさの時間変化が時間周波数 w_t で変調されることを意味している。したがって、この拘束式に基づいた速度検出は、画像の空間周波数成分を表現素としてその動きを検出することに相当する。

以上の違いを考慮すれば、特徴マッチングと時空間フィルタリングで検出される運動方向が異なるような刺激を構成することが可能である。このような刺激を用いた実験の結果から、仮現運動事態を構成する各フレームの呈示時間間隔 (inter-stimulus interval: ISI) が 40~60 ms 以下では時空間フィルタリングに対応した運動方向が知覚され、ISI がそれより長くなると特徴マッチングに対応した運動方向が知覚されることが示されている^{7,8)}。一方、ISI が 0 ms の連続呈示事態の場合でも、特徴マッチングと時空間フィルタリングが同時並行的に機能していることを示唆する結果も報告されている⁹⁾。

■S3 群 - 2 編 - 6 章

6-2 画像運動の空間的統合

(執筆者：朝倉暢彦) [2008年8月 受領]

前節で述べた時空間フィルタリングは、空間的に一次元の運動で定式化されていた。また、特徴マッチングも単独の特徴の対応のみが考慮されていた。これをより現実場面に即した多数の特徴の二次元運動の検出に適用しようとする、運動方向が一意に定まらない状況がしばしば生ずる。ここではそのような状況として (1) 窓枠問題、及び (2) 対応問題を取り上げ、運動情報の空間的な統合の必要性について述べる。

6-2-1 窓枠問題

ここでは特徴が一定速度で画像上の任意の方向に動くような二次元の運動を考える。一次元の運動の場合と同様にその時空間明るさパターン $I(x(t), y(t), t)$ の全微分を 0 とおくと次の拘束式を得る。

$$\nabla I^T \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (6 \cdot 3)$$

ここで、 $\mathbf{v} = (u, v)^T = (dx/dt, dy/dt)^T$ は速度ベクトル、 $\nabla I = (\partial I / \partial x, \partial I / \partial y)^T$ は明るさ勾配である。検出すべき速度成分が u と v の二つであるの対して、明るさの時空間変化はこの一つの拘束式を与えるのみである。したがって、この拘束式だけでは二次元の運動速度を一意に決定することはできない。

ここで u と v を座標軸とする速度平面を考える (図 6・2 (a))。この平面上の各位置が特定の速度を表現している。(6・3) 式はこの速度平面における直線を表しており、明るさ勾配 ∇I がその直線の法線となっている。この拘束直線から一意に決定できるのは、速度平面の原点から拘束直線までの距離であり、これは運動速度の明るさ勾配方向の成分である。そして明るさ勾配と直交する方向の成分は不定である。この曖昧性を窓枠問題 (aperture problem) という¹⁰⁾。

窓枠問題は、時空間明るさ変化の情報を空間的に統合することで解消することができる。ある特徴内の二つの位置で明るさ勾配及び明るさの時間微分が計測されたとすれば、それらの拘束直線の交点 (intersection of constraints: IOC) を求めれば真の運動速度が得られる。ただし、二つの位置での明るさ勾配の方向が等しい、すなわち二つの拘束直線が平行な場合にはもとの窓枠問題に戻ってしまい一意の解を得ることができない。この状況は、線分の動きをその端点が含まれないような狭い窓枠のなかで計測するような場合に生ずる。これが窓枠問題と呼ばれるゆえんである。

窓枠問題を解消するための空間的な運動統合を検討する心理学的研究では、異なる方位縞を空間的に重ねたブラッドパターン (plaid pattern) が刺激としてよく用いられてきた¹¹⁾。この刺激の運動方向は、前述の IOC に基づいた方向に知覚される場合と、要素となる各方位縞の明るさ勾配方向 (これは縞の方位に直交する方向に対応する) のベクトル平均 (vector average: VA) の方向に知覚される場合がある (図 6・2 (b))。ブラッドパターンは、要素となる各方位縞の運動方向が IOC の運動方向の両側にある場合をタイプ 1、要素運動の方向が IOC

の運動方向のどちらか片側にある場合をタイプ 2 と呼ぶ¹²⁾。IOC と VA が予測する運動方向はタイプ 2 のブラッド運動で大きく異なり、この場合に VA に対応した運動方向がよく知覚される。また、このような知覚される運動方向の違いは、刺激のコントラストや呈示時間を操作することによっても生ずる¹²⁾。

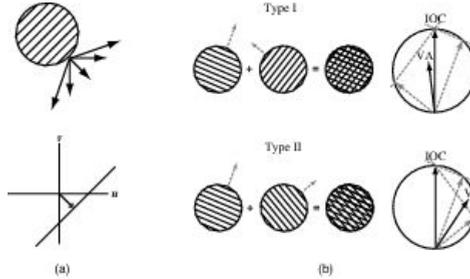


図 6・2 窓枠問題

(a) 円形の枠内で動く格子縞と速度空間。画像運動に対応する格子縞の速度は速度空間上の直線となる。(b) 二つの格子縞からなるブラッドパターン。点線の矢印が要素となる格子縞の運動方向を表す。VA が予測する運動方向はタイプ 2 のもので大きく異なる。

近年、Weiss らはブラッド運動の知覚を含め運動統合を統一的に説明する計算理論をベイズ推定の枠組みで定式化した¹³⁾。この理論では、IOC に基づいた運動統合とともに、より速度が遅い運動を選好的に知覚するというバイアスを取り入れることで、ブラッド運動で知覚される運動方向が IOC と VA を推移する状況を説明することができる。更に、このようなシンプルな構成にもかかわらず、様々な刺激事態における運動統合の知見が説明可能であり、その理論の有効性は注目すべきものである。

6-2-2 対応問題

(1) 計算理論

仮現運動事態において、各フレームの画像が複数の孤立した特徴で構成されている場合、各特徴の運動を特徴マッチングで決定するには、フレーム間でどの特徴がどの特徴に対応するかを決定する必要がある。しかし、各フレームの画像が N 個の特徴で構成されていれば、フレーム間ででの対応には N^N 通りの可能性があり、一意の対応を決定することは容易ではない。これが対応問題 (correspondence problem) である。

対応問題の解決には、(i) 対応の一意性、(ii) 特徴の適合性、及び (iii) 特徴の近接性の拘束条件が用いられていると考えられている。対応の一意性は、ある画像内の一つの特徴が別の画像の一つの特徴と 1 対 1 対応することを要請するものであり、この拘束条件によって、 N 個の特徴の対応の可能性は $N!$ に減少する。また、特徴の適合性は明るさ・色・コントラストなどの特徴の属性の類似性、特徴の近接性は特徴間の画像上での距離に基づく拘束条件であり、競合する対応候補が刺激に存在する場合、属性がより類似した特徴、及び距離がより短い特徴の間で対応がとられ、運動が知覚されることが示されている¹⁴⁻¹⁶⁾。Ullman は以上の拘束条件を満たす度合いを対応の親和力 (affinity) として、個々の特徴間の親和力の総和

が最大となる対応を選択することで対応問題を解く計算理論を提案した¹⁷⁾。この理論では、局所的な特徴の対応を決定する際にも、ある空間的範囲に存在する複数の対応候補の親和力を考慮するという点で空間的な相互作用を取り込んでいる。また Yuille と Grzywacz は Ullman の理論を発展させ、速度が空間的に滑らかに変化するという拘束条件に基づき、空間的な相互作用をより明示的に取り入れた計算理論を提案している^{18, 19)}。

(2) 時間的側面

以上の計算理論は、特徴の空間的特性からなる拘束条件に基づいて定式化されている。しかし、対応問題の解決には時間的な要因も考慮する必要がある。これを示す事例として、Ternus display と呼ばれる仮現運動がある (図 6・3 (a))。典型的な Ternus display では、水平方向に等間隔に配置された三つの点で第 1 フレームを構成し、これらの点をその間隔分水平方向にずらしたものを第 2 フレームとする。この刺激における特徴の対応は、フレーム間での 1 対 1 対応を仮定しても 6 通りの可能性があるが、実際に知覚されるのは ISI に応じてそのうち 2 通りのいずれかである (図 6・3 (b))。すなわち、ISI が短い場合、中央の 2 点は静止したままで端の点が水平方向に移動する *element motion* が知覚される。一方、ISI が長い場合には、全ての点が水平方向に移動する *group motion* が知覚される。これらの知覚の切り替りは、40～50 ms の ISI で生ずることが知られている²⁰⁾。

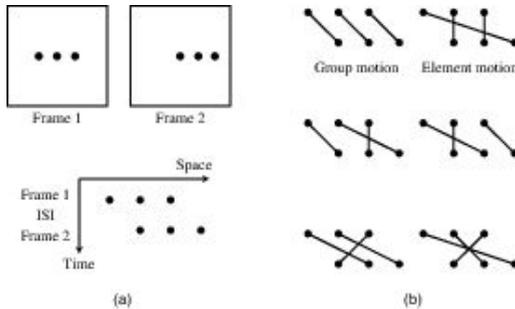


図 6・3 Ternus display

(a) Ternus display を構成するフレーム及びその時空間表現。(b) フレーム間で各点が 1 対 1 対応するという拘束のもとでの Ternus display における可能な対応。

Ternus display における二つの運動印象は、運動視におけるショートレンジ (SR) システムとロングレンジ (LR) システムによって生ずると考えられてきた²¹⁾。SR システムは時間・空間的に短い運動を処理するもので、時空間フィルタリングによる運動検出に対応する。また LR システムは時間・空間的に長い運動を処理するもので、特徴マッチングによる運動検出に対応する。ISI が長い場合、SR システムの処理できる時間範囲を超えるため LR システムが *group motion* を生じさせる。一方、ISI が短い場合、SR システムにより中央の点が静止していることが検出される。したがって、運動は端の点の移動によって生ずることになるが、その距離は SR システムの処理できる空間範囲を超えるため、LR システムによって *element motion* が生ずる²²⁾。

この SR・LR システムを想定した説明は広く受け入れられてきたが、最近の研究では SR システムの関与を否定する結果も得られている。すなわち、運動要素が静止していることを検出するのは SR システムではなく、様々な特徴次元の変化を検出する特徴追跡システムであり、これは特徴マッチングを担う LR システムの特性であることが示唆されている²³⁾。また Dawson は、(i) 対応の一意性、(ii) 特徴の近接性、及び (iii) 運動の滑らかさの拘束条件に基づいて対応問題を解決するコネクショニストモデルを構築し、近接性の拘束条件の強さを制御することで Ternus display の知覚を説明できることを示している²⁴⁾。これも Ternus display の知覚を特徴マッチングの枠組みで捉えるべきであることを示唆するものである。ただし、Dawson のモデルでは時間的要因が取り扱われておらず、ISI の効果を直接説明することはできない。現状では対応問題の時間的要因を直接扱った計算理論は提案されておらず、今後の研究の進展が待たれるところである。

■S3 群 - 2 編 - 6 章

6-3 画像運動による自己及び外界の理解

(執筆者：朝倉暢彦) [2008年8月 受領]

画像運動は、外界における観察者と対象の相対運動を画像へと射影することで生成される。射影の過程で三次元から二次元へと情報が落ちてはいるが、生体の視覚系は検出された画像運動を適切に解釈し、外界における自己と対象の相対運動や対象の三次元構造の情報を得ている。ここでは、画像運動に基づいて自己及び外界の状態を知覚する機能について述べる。

6-3-1 自己運動方向の知覚

歩行や障害物回避といった自己運動の制御において、観察者が自己の並進運動の方向を知ることが極めて重要である。観察者の運動が並進運動のみである場合、画像上に生ずる速度場（オプティカルフロー）は拡大フローパターンとなり、その拡大中心（focus of expansion: FOE）の画像上での位置が並進運動方向を表している（図 6・4 (a)）。よって、オプティカルフローの速度が 0 となる特異点を FOE として定位することで並進運動の方向を知ることができる。このような拡大フローパターンから知覚される運動方向の弁別精度は 1 deg 程度とかなり高いことが報告されている²⁵⁾。

一方、観察者の運動に回転運動が含まれている場合、オプティカルフローの特異点と並進運動方向は一般に一致しない。例えば、障害物を注視しながらぶつからない方向に移動する場合、速度が 0 となる特異点は自己の並進運動方向ではなく、注視点の方向に対応する。この場合のオプティカルフローは、視線を注視点に維持するための眼の回転運動による成分が並進運動の成分に重畳されたものとなっている（図 6・4 (b)）。

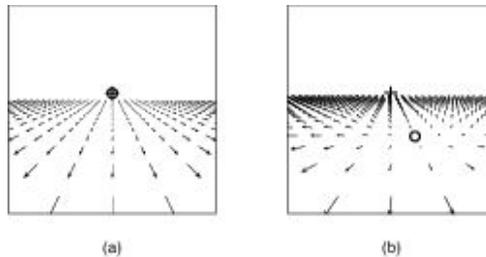


図 6・4 観察者が地面の上を進むときのオプティカルフロー

- ＋は並進運動方向 (FOE)，○は注視点。(a) 並進運動成分のみから生成されるオプティカルフロー。
- (b) 並進運動成分に回転運動成分が加わったオプティカルフロー。

回転運動を含んだオプティカルフローから並進運動方向を計算する方略としては、(i) 最小 2 乗法に基づいたアプローチ²⁶⁾、及び(ii) 差分ベクトルを利用したアプローチがある^{27, 28)}。最小 2 乗法によるアプローチでは、様々な並進運動方向を示すテンプレートを画像の各領域に設定し、その出力を足し合わせることで、大域的な最小 2 乗解として並進運動方向を推定する。この方略はニューラルネットワークとして実現可能であり、その妥当性が神経生

理実験で確認されている²⁹⁾。一方、差分ベクトルによるアプローチでは、オブティカルフローの回転運動成分が外界の奥行き構造に依存しないことを利用して、奥行きが急峻に変化する部分のオブティカルフローの差分ベクトルを計算することで回転運動成分をキャンセルして並進運動成分のみを取り出す。この方略に対応する心理学的知見として、外界の奥行きの変動が大きい環境ほど知覚される並進運動方向の精度が高くなるという結果が示されている³⁰⁻³²⁾。

以上の方略は、オブティカルフローのみから回転運動成分と独立に並進運動方向を計算するものである。しかし、眼球の回転によって回転運動成分が生成されているとすれば、眼筋の自己受容感覚や運動指令の遠心性コピーなどの網膜外情報 (extra-retinal information) から回転運動の情報を得て、その成分をキャンセルすることも可能である。この網膜外情報の効果を検討するため、並進運動のみからなるオブティカルフロー刺激を、実際に眼球を動かしながら観察する条件と、眼球をそのように動かしたときに観察されるオブティカルフローをシミュレートした刺激を、眼球を動かさずに観察する条件とで知覚される並進運動方向を比較するという実験が行われてきた。Warren と Hannon は、奥行きの変動が大きい環境を観察する場合、実際に眼を動かす条件と眼球運動をシミュレートした条件で並進運動知覚の誤差に差がないことを示した³²⁾。彼らの実験では、環境内で静止した点を注視するための眼球運動がシミュレートされており、その回転速度はせいぜい 1.5 deg/s 程度の比較的ゆっくりとしたものであった。一方、Royden らは、より速い回転速度で、環境内で動く点を追従する眼球運動をシミュレートした場合、知覚される並進運動方向には大きな誤差が生ずることを示した³³⁾。彼女らは、1 deg/s を超えるような回転運動成分が存在する場合、オブティカルフローから正しい並進運動方向を知覚するには網膜外情報が必要となることを示唆している。しかし、比較的速い眼球運動をシミュレートした場合でも、かなり正確な並進運動方向が知覚されるという知見も報告されており^{31, 34, 35)}、並進運動方向の知覚に網膜外情報が常に必要とされるわけではない。

6-3-2 視覚誘導性自己運動感覚

自己運動感覚とは、自らの身体が動いている状態にあることを知覚する機能である。自己運動を検知するための基礎となっているのは前庭感覚系であるが、その応答は加速度に基づいた一過性のものである。等速運動状態における持続的な運動感覚は視覚系によって担われており、画像運動の観測によって生起するその感覚を視覚誘導性自己運動感覚 (vection) という。

(1) 回転運動による視覚誘導性自己運動感覚 (circular vection : CV)

身体の回転軸には垂直・水平・回旋の3軸があるが、これまで最もよく研究されてきたのは垂直軸まわりの回転運動に対する視覚誘導性自己運動感覚 (以下、CV) である。実験装置としては被験者の視野を完全に覆う回転ドラムがよく使われる。ドラムの内部はテクスチャが貼付けられ、ドラムの回転に伴って水平方向のオブティカルフローが生成される。ドラムが回転し始めると、被験者は最初ドラムが回転していると感じるが、ドラムの回転が等速運動となってから数秒経つとドラムが回転しているという感覚が弱まり、それと同時に自分自身がドラムと逆方向に回転していると感じ始める。

CV の生起を促進する要因としては、(i) オブティカルフロー刺激が視野周辺部に呈示され

ること⁴⁰⁾、及び(ii) オプティカルフロー刺激が背景として知覚されること⁴¹⁾が示されている。Howard と Heckmann は視野中心部刺激と周辺部刺激の奥行き関係を変えて CV を測定し、CV の視野周辺部優位性と背景の優位性の相互作用を検討した⁴²⁾。その結果、視野中心部に静止刺激、周辺部にオプティカルフロー刺激が呈示される場合には、中心部刺激と周辺部刺激の奥行き関係によらず CV が生起された。一方、視野中心部にオプティカルフロー刺激、周辺部に静止刺激が呈示される場合、中心部刺激が周辺部刺激の手前に見えるときはほとんど CV が生起されないが、中心部刺激が背景として見えるときには CV が生起されることが明らかにされた。

(2) 並進運動による視覚誘導性自己運動感覚 (linear vection : LV)

身体の並進運動方向としては左右・上下・前後の三つの方向が考えられるが、普段の行動で最も重要なものは前後方向で特に前方向の並進運動である。先に述べたように、前方向の運動に伴って拡大するオプティカルフローが得られる。そして進行方向を注視していれば FOV は視野中心に存在する。よって、この場合、前方向の並進運動による視覚誘導性自己運動感覚 (以下、LV) を生起させるオプティカルフロー刺激は、視野中心部に呈示された場合は FOV を含むが、周辺部に呈示された場合は FOV を含まず、異なった見えの刺激となる。

視野中心部に FOV を含むオプティカルフロー刺激が呈示された場合、垂直軸まわりの CV とは異なり周辺部の寄与は少なく視野中心部が優位性をもっており、10 deg 程度の視野の大きさで十分な LV が生起する⁴³⁾。また、拡大フローパターンの手前に透明の静止刺激を呈示しても LV は影響を受けないが、拡大フローパターンの背景に静止刺激を呈示すると LV が抑制されるという背景の優位性がある⁴⁴⁾。一方、視野周辺部に FOV を含まないオプティカルフロー刺激が呈示された場合には、刺激面積の増加に伴って知覚される自己運動が大きくなるという視野周辺部優位性ととともに、背景刺激の優位性もみられる⁴⁵⁾。

以上をまとめると、CV であっても LV であっても背景として知覚される視覚刺激に対応した自己運動感覚 (静止しているという感覚も含む) が引き起こされるということになる。観察者が対峙する外界は、近くにある対象物体と遠方の背景とに大まかに切り分けて考えることができる。観察者と対象物体は独立に運動するので、その相対運動を反映した画像運動には観察者が動いた場合と対象物体が動いた場合の両方の可能性がある。一方、外界において背景は不動であるので、背景が動く画像運動は観察者が動いた場合にのみ得られる。したがって、背景に関する情報で自己運動感覚が生起するというシステムは外界の構造を反映した合理的なものとなっている。

6-3-3 運動からの構造復元

画像運動から外界の対象の三次元構造を推定することを運動からの構造復元 (structure from motion) という。Longuet-Higgins と Prazdny は、画像運動を構成する各フレームの画像が透視射影で観測される場合、対応が決定された五つの特徴点を 2 フレームにわたって観測することで外界の剛体構造とその運動を復元することが可能であることを示した²⁷⁾。一方、Ullman は、透視射影を局所的に近似する直交射影で画像が観測される場合、2 フレームの画像を観測しただけでは外界の構造を一意に復元することができないことを示した¹⁷⁾。より具体的には、同一平面上にない四つの特徴点を 3 フレームにわたって観測することにより、剛体性の仮定のもとで外界の奥行き構造とその運動を一意に決定できるという運動からの構造

復元の定理を導いた。ただし、この定理は、剛体構造を決定するのに2フレームの観測が十分でないことを主張するものではあるが、2フレームの仮現運動から外界の構造に関して何の情報も得られないことを意味するものではない。

Koenderink と van Doorn は、直交射影で生成された2フレームの画像の対応からでも、アフィン変換に対して不変な外界の構造が復元できることを示した³⁶⁾。アフィン変換とは回転と並進のユークリッド変換に剪断変換を加えた線形変換であり、任意の滑らかな空間変換は局所的にはこのアフィン変換で記述することができる。彼らは更に、外界の空間構造がユークリッド変換に従って変化するという剛体性の仮定をアフィン復元の枠組みに導入することで、外界の物体の奥行き構造をその物体の回転運動量による奥行きのスケージングの曖昧性を残して復元することができることを示した。これは奥行き方向に特異的な伸長・収縮の変換（このような変換はアフィン変換のなかでも特に **bas-relief** 変換³⁷⁾と呼ばれる）に対しての不変量が復元されることを意味している。

このようなアフィン構造が復元されたうえで、物体を更に回転させたときの第3フレーム目の画像が観測できれば、その画像には実際の奥行き方向の成分が射影されているので、これを用いればスケージングの曖昧性を解消しユークリッド構造を復元することができる。これが Ullman の定理の意味するところである。しかし、実際の知覚においては、三次元空間での長さや角度の弁別といったユークリッド構造に関する判断の精度はかなり悪く、その精度はフレーム数が3以上に増えてもほとんど改善しないが、平面性の検出や剛体と非剛体構造の弁別といったアフィン構造に関する判断の精度は2フレームの仮現運動においても非常に良いことが示されている³⁸⁾。更に、非剛体な物体の変形のなかでも、奥行き方向に伸長・収縮するような変形を検出する感度が極めて悪いことが報告されている³⁹⁾、これらの知見を考慮すると、局所的な画像運動から剛体性の仮定のもとで知覚されている外界の奥行き構造は、**bas-relief** 変換の不定性をもったアフィン構造であることが示唆される。

6-3-4 バイオロジカルモーション

画像運動からは外界の非剛体構造も推定することができる。非剛体運動の典型例としては、生体の関節運動があげられる。生体の視覚系が他者の関節運動による動きに対して非常に高い感度をもっていることは、Johansson によるバイオロジカルモーションの研究によって見事に示された⁴⁰⁾。この研究では、人間の主要な関節位置に光点を取り付け、人間の動きがそれらの光点の軌跡のみで構成される画像運動刺激を作成した。この刺激には身体を明示する輪郭が欠如しているため、その1フレームを観察しただけでは単なる光点の集合としか知覚されない。しかし、数フレームに渡って呈示することにより、光点の画像運動に基づいて明確な人間の動きが知覚される（**図 6・5**）。

バイオロジカルモーションからの人間の動きの知覚は非常に頑健である。刺激呈示時間が100 msec 程度、もしくは6点程度の光点の数でも人間の動きを知覚することが可能であり⁴⁰⁾、光点の数をはるかに超える数の動的ノイズのなかでも動きの知覚が成立する⁴⁸⁾。また、バイオロジカルモーションからは、個人の同定⁴⁹⁾や性別の判断⁵⁰⁾、また他者の行動の内容⁵¹⁾や喚起されている感情⁵²⁾についての判断が可能である。更に、動きが知覚できる対象は人間に限ったことではなく、ほかの動物のバイオロジカルモーションからその種を同定することもできる⁵³⁾。

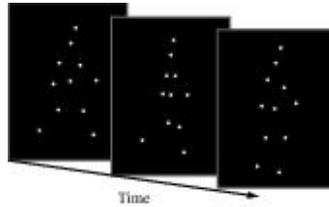


図 6・5 バイオロジカルモーション

この画像系列は Cutting のアルゴリズム⁴⁷⁾に基づいて生成した。

一方、バイオロジカルモーションの知覚は呈示方位に特異的である。すなわち、上下逆さまに呈示すると生体の動きとしての知覚が著しく阻害される⁵⁴⁾。そしてこの特異性は事前に呈示方位に関する情報を与えても変化しない⁵⁵⁾。また、バイオロジカルモーションの知覚は各光点の運動の位相関係にも強く依存しており、各光点が動き始める時刻をずらすと、生体の動きとして知覚することが非常に困難となる⁵⁶⁾。

三次元構造の復元という観点では、バイオロジカルモーションは局所的な剛体運動で構成されているとみなすことができる(全体としては非剛体運動である)。Hoffman と Flinchbaugh は、局所的剛体性を仮定した運動からの構造復元の枠組みでバイオロジカルモーションの三次元構造とその運動が復元できることを示した⁵⁷⁾。しかし、バイオロジカルモーションの呈示方位特異性は、この枠組みが生体の視覚系で採用されているとしても、与えられた画像運動に対して自動的に適用されるわけではないことを示している。また、バイオロジカルモーションを生体の関節運動として復元するかどうかは画像運動の速さにも依存しており、通常の身体運動より遅い速度で呈示された場合、光点の集合全体が剛体性をもって知覚されることが報告されている⁵⁸⁾。以上の事例は、バイオロジカルモーションの知覚が単なる画像運動の分析に基づく非剛体構造の復元ではなく、観察される生体の運動に特異的な事前知識を用いた画像運動の解釈であることを示唆している。

■参考文献■

- 1) D. Marr and S. Ullman, "Directional selectivity and its use in early visual processing," Proc. R. Soc. Lond. B 211, pp.151-180, 1981.
- 2) E.H. Adelson and J.R. Bergen, "Spatiotemporal energy models for the perception of motion," J. Opt. Soc. Am. A 2, pp.284-299, 1985.
- 3) D.J. Heeger, "Model for the extraction of image flow," J. Opt. Soc. Am. A 4, pp.1455-1471, 1987.
- 4) N.M. Grzywacz and A.L. Yuille, "A model for the estimate of local image velocity by cells in the visual cortex," Proc. R. Soc. Lond. B 239, pp.129-161, 1990.
- 5) 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," J. Neurophysiol., vol.69, pp.1091-1117, 1993.
- 6) R.C. Emerson, J.R. Bergen and E.H. Adelson, "Directionally selective complex cells and the computation of motion energy in cat visual cortex," Vis. Res., Vol.32, pp.203-218, 1992.
- 7) M.A. Gergeson and M.G. Harris, "The temporal range of motion sensing and motion perception," Vis. Res., vol.30, pp.615-619, 1990.

- 8) N.E. Scott-Samuel and M.A. Gergeson, "Feature matching and segmentation in motion perception," *Proc. R. Soc. Lond. B* 266, pp.2289-2294, 1999.
- 9) A.T. Smith and T. Ledgeway, "Motion detection in human vision: a unifying approach based on energy and features," *Proc. R. Soc. Lond. B* 268, pp.1889-1899, 2001.
- 10) B.K. P. Horn and B.G. Schunk, "Determining optical flow," *Artif. Intell.*, vol.17, pp.185-203, 1981.
- 11) E.H. Adelson and J. A. Movshon, "Phenomenal coherence of moving visual patterns," *Nature*, vol.300, pp.523-525, 1982.
- 12) C. Yo and H. Wilson, "Perceived direction of moving two-dimensional patterns depends on duration, contrast, and eccentricity," *Vis. Res.*, vol.32, pp.135-147, 1992.
- 13) Y. Weiss, E.P. Simoncelli and E.H. Adelson, "Motion illusions as optimal percepts," *Nat. Neurosci.*, vol.5, pp.598-604, 2002.
- 14) S. Shechter and S. Hochstein, "Size, flux and luminance effects in the apparent motion correspondence process," *Vis. Res.*, vol.29, pp.579-591, 1989.
- 15) S.M. Anstis and G. Mather, "Effects of luminance and contrast on direction of ambiguous apparent motion," *Perception*, vol.14, pp.167-179, 1985.
- 16) S. Shechter, S. Hochstein and P. Hillman, "Shape similarity and distance disparity as apparent motion cues," *Vis. Res.*, vol.28, pp.1013-1021, 1988.
- 17) S. Ullman, "The Interpretation of Visual Motion," MIT Press, Cambridge, Mass., 1979.
- 18) A.L. Yuille and N.M. Grzywacz, "A computational theory for the perception of coherent visual motion," *Nature*, vol.333, pp.71-74, 1988.
- 19) A.L. Yuille and N.M. Grzywacz, "A mathematical analysis of the motion coherence theory," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.3, pp.155-175, 1989.
- 20) A.J. Pantle, and L. Picciano, "A multistable movement display: Evidence for two separate motion systems in human vision," *Science*, vol.193, pp.500-502, 1976.
- 21) O.J. Braddick, "Low-level and high-level processes in apparent motion," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol.B 290, pp.137-151, 1980.
- 22) O.J. Braddick and A. Adlard, "Apparent motion and the motion detector," In J. C. Armington, J. Krauskopf, and B. R. Wooten (Eds.) *Visual Psychophysics and Psychology*, Academic Press, New York, 1978.
- 23) N.E. Scott-Samuel and R.F. Hess, "What does the Ternus display tell us about motion processing in human vision?," *Perception* 30, pp.1179-1188, 2001.
- 24) M.R. Dawson, "The how and why of what went where in apparent motion: modeling solutions to the motion correspondence problem," *Psychol. Rev.*, vol.98, pp.569-603, 1991.
- 25) W.H. Warren, M.W. Morris and M. Kalish, "Perception of translational heading from optical flow," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol.14, pp.646-660, 1988.
- 26) D.J. Heeger and A.D. Jepson, "Subspace method for recovering rigid motion I: algorithm and implementation," *Int. J. Comp. Vis.*, vol.7, pp.95-117, 1992.
- 27) H.C. Longuet-Higgins and K. Prazdny, "The interpretation of a moving retinal image," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. B 208, pp.385-397, 1980.
- 28) J. H. Rieger and D.T. Lawton, "Processing differential image motion," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A 2, pp.354-360, 1987.
- 29) M. Lappe, Mand J.P. Rauschecker, "A neural network for the processing of optic flow from ego-motion in higher animals," *Neural Comput.*, vol.5, pp.374-391, 1993.
- 30) J.E. Cutting, "Perception with an eye towards motion," MIT Press, Cambridge, Mass., 1986.
- 31) J.H. Rieger and T. Toet, "Human visual navigation in the presence of 3D rotations," *Biol. Cybern.*, vol.52, pp.377-381, 1985.
- 32) W.H. Warren and D.J. Hannon, "Eye movements and optical flow," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A 7, pp.160-169, 1990.
- 33) C.S. Royden, M.S. Banks and J.A. Crowell, "The perception of heading during eye movements," *Nature*, vol.360, pp.583-585, 1992.
- 34) A.V. van den Berg, "Robustness of perception of heading from optical flow," *Vis. Res.*, vol.32, pp.1285-1296,

- 1992.
- 35) L. Stone and J. Perrone, "Human heading estimation during visually simulated curvilinear motion," *Vis. Res.*, vol.37, pp.573-590, 1997.
 - 36) J.J. Koenderink and A.J. van Doorn, "Affine structure from motion," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A 8, pp.377-385, 1991.
 - 37) P.N. Belhumeur, D.J. Kriegman and A.L. Yuille, "The bas-relief ambiguity," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.35, pp.33-44, 1999.
 - 38) J.T. Todd and P. Bressan, "The perception of 3-dimensional affine structure from minimal apparent motion sequences," *Percept. Psychophys.*, vol.48, pp.419-430, 1990.
 - 39) J.F. Norman and J.T. Todd, "The perceptual analysis of structure from motion for rotating objects undergoing affine stretching transformations," *Percept. Psychophys.*, vol.53, pp.279-291, 1993.
 - 40) T. Brandt, J. Dichgans and E. Koexig, "Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception," *Exp. Brain Res.*, vol.16, pp.476-491, 1973.
 - 41) M. Ohmi, I.P. Howard and J.P. Landolt, "Circular vection as a function of foreground-background relationships," *Perception*, vol.16, pp.17-22, 1987.
 - 42) I.P. Howard and T. Heckmann: "Circular vection as a function of the relative sizes, distances, and positions of two competing visual displays," *Perception*, vol.18, pp.657-665.
 - 43) G.J. Anderson and M.L. Braunstein, "Induced self-motion in central vision," *J Exp. Psychol. Vol.1*, pp.122-132, 1985.
 - 44) M. Ohmi and I.P. Howard, "Effect of stationary objects on illusory forward motion induced by a looming display," *Perception*, vol.17, pp.5-12, 1988.
 - 45) A. Delorme and C. Martin, "Roles of retinal periphery and depth periphery in linear vection and visual control of standing in humans," *Can. J. Psychol.*, vol.40, pp.17-187, 1986.
 - 46) G. Johansson, "Visual perception of biological motion and a model for its analysis," *Percept. Psychophys.*, vol.14, pp.195-204, 1973.
 - 47) J.E. Cutting, "A program to generate synthetic walkers as dynamic point-light displays," *Behav. Res. Methods Instrum.*, vol.10, pp.91-84, 1978.
 - 48) J.E. Cutting, C. Moore and R. Morrison, "Masking the motions of human gait," *Percept. Psychophys.*, vol.44, pp.339-347, 1988.
 - 49) N.F. Troje, C. Westhoff and M. Lavrov: "Person identification from biological motion: effects of structural and kinematic cues," *Percept. Psychophys.*, vol.67, pp.667-675, 2005.
 - 50) G. Mather and L. Murdoch, "Gender discrimination in biological motion displays based on dynamic cues," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol.B 258, pp.273-279, 1994.
 - 51) W.H. Ditttrich, "Action categories and the perception of biological motion," *Perception*, vol.22, pp.15-22, 1993.
 - 52) T.J. Clarke, M.F. Bradshaw, D.T. Field, S.E. Hampson and D. Rose, "The perception of emotion from body movement in point-light displays of interpersonal dialogue," *Perception*, vol.34, pp.1171-1180, 2005.
 - 53) G. Mather and S. West, "Recognition of animal locomotion from dynamic point-light delays," *Perception*, vol.22, pp.759-766, 1993.
 - 54) S. Sumi, "Upside-down presentation of the Johansson moving light-spot pattern," *Perception*, vol.13, pp.283-286, 1984.
 - 55) M. Pavlov and A. Sokolov, "Prior knowledge about display inversion in biological motion perception," *Perception*, vol.32, pp.937-946, 2003.
 - 56) B.I. Bertenthal and J. Pinto, "Global processing of biological motions," *Psychol. Sci.*, vol.5, pp.221-225, 1994.
 - 57) D.D. Hoffman and B.E. Flinchbaugh, "The interpretation of biological motion," *Biol. Cybern.*, vol.42, pp.195-204, 1982.
 - 58) J.A. Beintema, A. Oleksiak and R.J.A. van Wezel, "The influence of biological motion perception on structure-from-motion interpretations at different speeds," *J. Vis.*, vol.6, pp.712-726, 2006.