

運動する観察者における奥行構造／相対運動の曖昧性解決に表面の連続性が及ぼす影響

北崎充晃・下條信輔

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系 認知行動科学心理学教室
〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. はじめに

私たちは本来的に運動しながら環境内を探索し、外界対象を知覚し、また環境と事象に応じて自らの行動を制御している。そこでは、視野内の「運動／光流動」は、単に外界対象の運動を意味するのみならず、その対象物体の奥行き構造、観察者の自己運動をも同時に意味する可能性／曖昧性がある。本研究は、このような自然な生態環境で常に生じうる曖昧性に注目し、生体の運動視知覚の大局的な機能と機構を統合的に理解することを最終的な目標とする研究の一部として行われた。まず「運動視の問題」の設定を行った。運動視の問題とは、我々は網膜を通してなにを見ているのかという問いであり、生体の情報処理として、どのような情報が扱われているのかという問いである。私は、それを生態順光学過程として網膜上運動像に投影された実空間の“対象構造”，“対象運動”および“自己運動”の三者を、生態逆光学としての知覚において分解し抽出することであると考えた。つまり、光流動から“対象構造”，“対象運動”および“自己運動”を知覚することである (Nakayama, 1985¹⁾; Gibson, 1968²⁾)。たとえば、頭部の運動方向と平行な光流動の運動成分 (運動視差) は、外界対象の奥行きから生じたものとしても、また外界対象の相対運動そのものとしても、解釈されうる (Ono and Steinbach, 1990³⁾)。本研究では、とくにこの曖昧性を解決する理論と要因を探求した。

いったん失われた情報を知覚として復元する生態逆光学過程を理解するために、そこに存在する曖昧さ解決のための制約条件と処理の優先順位の

「計算理論」を立てた。「観察者移動時の運動視差符号制約条件」は、生態環境における対象の奥行き順序、対象の光流動上の相対運動、そして自己運動との関係を、幾何光学的に記述する。そして、その根底に、実空間においてあらゆる対象は無作為に運動しており、その平均運動は0であるという仮定をおくことで、「剛体・静止の仮定」をとる必要がなくなり、理論を一般化することが出来た。具体的には、「実空間において、対象の剛体静止が許されない場合、つまり、対象自体の相対運動が存在するとき、観察者の網膜上運動像においては、手前の対象の奥の対象に対する網膜像上の相対運動の方向は自己運動の方向と同じになる」と記述される。さらに、この制約条件の“振り舞い”に関して、「処理の優先順位」に関する予想を立てた。処理の優先順位は、以下のように対象の定性的構造特性に依存する。光流動に運動の不連続が存在し、対象表面の不連続が知覚される場合、奥行き順序が先に割り当てられ、その奥行き順序は安定に保たれたまま、次に自己運動と制約条件に依存して相対運動量そして／あるいは奥行き量が決定される。具体的には、制約条件が剛体静止を許さない場合に大きい相対運動が知覚され、剛体静止が許される場合 (従来の言葉で言えば、運動視差と一致した場合) に深い奥行きが知覚され相対運動はほとんど知覚されないであろう。一方、光流動に連続的な速度勾配が少なく、なめらかな表面が知覚されるとき、奥行き順序の決定は自己運動と制約条件のチェックに先んじられ、その結果、制約条件が剛体性を許す場合になるように、つまり奥行きが大きく相対運動が小さくなるように、奥行き順序そのものが決定さ

れるはずである。以下の実験結果はこれらの予想と概ね一致することとなった。

2. 実験 1

2.1 方法

視覚刺激として、コンピュータで生成・制御した、(a) 動的遮蔽（縞模様・出現と消失）、(b) 均一速度の透明運動、(c) 速度を正弦波状に変化させたずれ運動（図1）を用いた。縞模様の動的遮蔽以外は、ランダムドットの運動で構成された運動画像であった。いずれも画像上に相対運動が存在した。視覚刺激（運動視差）と頭部運動との同期をとらない実験パラダイムを用いた（c.f., Rogers and Graham, 1979⁹）。被験者は、準暗室中で、約60cmの観察距離から頭を左右に揺らしながら（幅約67cm, 0.5Hz）単眼で刺激を観察し、(1) 知覚された奥行き順序、および(2) 左右どちらに自己運動している最中に相対運動が大きく知覚されるかを報告した。各刺激条件(a-b)は、別セッションとして行われ、各々被験者5人（2人は研究者本人、3人は実験の目的を知らない被験者）が参加した。

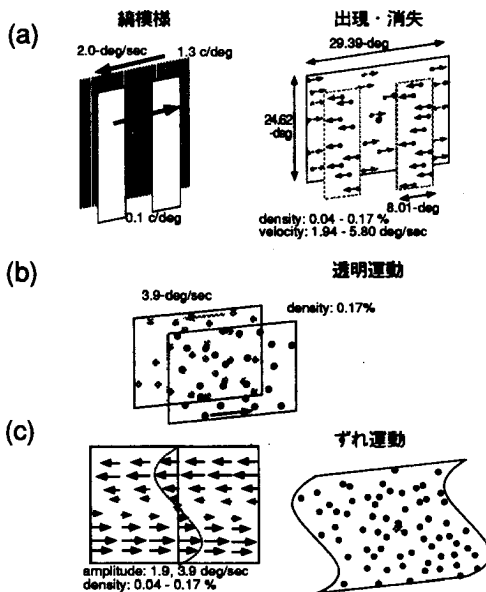


図1 実験1で用いた視覚刺激。(a)は、それぞれ縞模様・出現と消失によって構成された動的遮蔽であり、奥行き順序が一意に決定する。(b)は、透明運動視であり、被験者によって任意の奥行きが知覚される。(c)は、なめらかなずれ運動であり、なめらかな表面構造が知覚される。

2.2 結果と考察

(a) 遮蔽によって規定された奥行き順序、その光流動中の相対運動、および自己運動方向の関係が制約条件において剛体静止を許す場合（これらの条件をみたす頭部運動方向時）には、対象の相対運動は小さく知覚され、剛体静止を許さない場合に大きい対象運動が知覚された。これは、制約条件からの仮説と一致した結果であった。(b) 上記条件(a)と同様の結果が得られた。ただし、この刺激では奥行き順序の手がかりがないにも関わらず、被験者が内的に知覚し報告した奥行き順序が制約条件に利用された。(c) 被験者は、頭部運動方向の変化と同時に奥行き順序そのものが変化することを報告し、上記の課題が実行不可能であることを報告した。そこで、各頭部運動方向（左/右）における奥行き順序判断を課題とした。その結果、知覚された奥行き順序は、光流動中の相対運動、および自己運動方向の関係が剛体静止を許す場合になるように決定された。つまり、自己運動方向の反転に応じて常に静止しがちに見えるように奥行き順序が反転した。

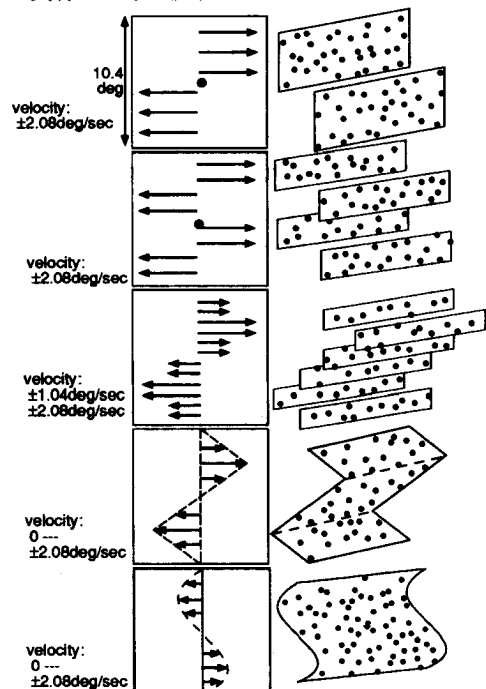


図2 実験2で用いた視覚刺激。上から順に、矩形波2領域、矩形波4領域、階段波、三角波、正弦波。段階的に運動速度の不連続性が操作しており、図中の下の刺激ほど連続的である。なお、点の輝度は6.93 cd/m²、密度は0.56%であった。

これらの結果は、生体視知覚系が制約条件に従うように働くと同時に、その“振る舞い方”に2種類（相対運動／奥行き反転）あることを示した。奥行き順序を固定し、頭部運動に応じた“相対運動”を知覚するのは、まず遮蔽のような奥行き順序手がかりが存在するとき（条件(a)）である。しかし、条件(b)および(c)の比較から、奥行き順序の手がかりがなくとも、運動速度の不連続が存在し、表面の不連続が知覚される時“相対運動”が知覚され、表面がなめらかな単一の対象物体として知覚される時“奥行き反転”が知覚されることが示唆された。そこで、次の実験ではこの表面の不連続性を段階的に操作して、その効果を直接的に検証した。

3. 実験2

3.1 方法

視覚刺激として、水平方向のランダムドット相対運動刺激を用いた。ただし、速度の不連続性を段階的に操作し、5条件（矩形波2領域、矩形波4領域、階段波、三角波、正弦波）を設定した（図2）。5条件×運動方向2種類×繰り返し10回の計100試行が無作為な順で各被験者に課せられた。被験者は、準暗室中で、約57cmの観察距離から頭を左右に揺らしながら（幅約45cm、0.5Hz）単眼で刺激を観察し、自己運動方向の反転に応じて知覚される奥行き順序の反転が生じるか否かを報告した。被験者5人（1人は研究者本人、4人は実験の目的を知らない被験者）が参加し

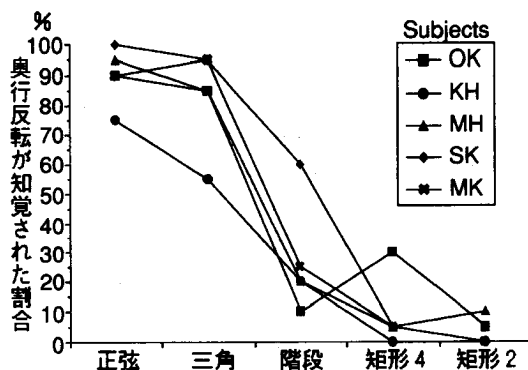


図3 実験2の結果。奥行き反転が知覚された割合を刺激条件に対してプロットした。運動速度／表面が不連続になるに応じて比較的段階的に奥行き反転が生じにくくなった。

た。

3.2 結果と考察

正弦波から矩形波へと運動速度の不連続性が増すに従って、奥行き反転は生じにくくなった（図3）。よって、運動速度の不連続性から導かれる表面の不連続性の知覚が、相対運動／奥行き反転の知覚の決定因子となっていることが示された。

さて、表面の不連続は生体にとってどのような意味をもつのか。その一つのこたえは、「物体の複数性」であろう。次の実験では、表面の（不）連続性と物体の複数性を独立に操作し、物体の複数性の観点からの考察を試みた。

4. 実験3

4.1 方法

視覚刺激として、水平方向のランダムドットずれ運動を用いた。ある正弦波に逆位相の正弦波を重ねた条件（複数物体条件；図4）とある正弦波に動的ノイズを重ねた条件（ノイズ条件）を設定し、各々逆位相の正弦波／動的ノイズを構成するドットの密度を0.01%から0.56%まで5段階に操作した。2条件×5密度水準×運動方向2種類×繰り返し9回の計180試行が無作為な順で各被験者に課せられた。被験者の課題は実験2と同一であった。

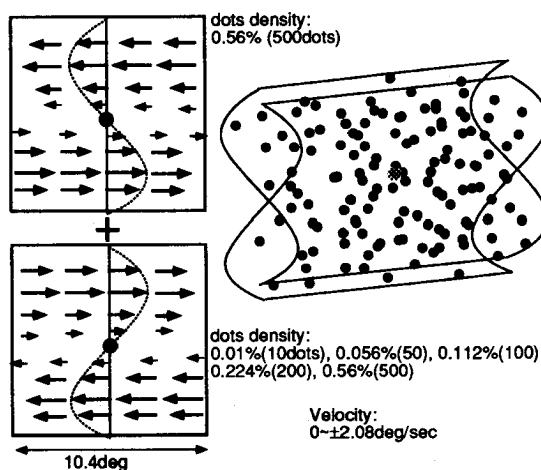


図4 実験3で用いた視覚刺激（複数物体条件）。逆位相の2つのなめらかなずれ運動を重ね、一方の点密度を段階的に操作した。ノイズ条件では、密度を操作する点を動的ノイズとなるように呈示した。

4.2 結果と考察

複数物体条件では、逆位相の正弦波を構成するドットの密度が高くなり、複数（2つ）の表面／物体が知覚されるようになると、各表面はなめらかであるにも関わらず、奥行き反転は生じにくくなった。一方、ノイズ条件では、密度が高くなっても奥行き反転は比較的しじにくならなかった（図5）。これらのことは、物体の複製性が奥行き反転を抑制していることを示唆する。

5. 総合考察

視知覚系は運動視差符号制約条件が常に妥当になるように働くことが示された。ただし、その制約条件の振る舞いには2種類あり、表面の不連続性がその振る舞いを決定していることが示された。つまり、表面が不連続な場合、知覚される奥行き順序は安定に固定され、頭部運動方向に応じた相対運動が知覚された。一方、表面が連続な場合、奥行き順序そのものを反転してさえ、相対運動が小さくなるように知覚された。さらに、表面

の不連続性は対象物体の複数性を意味することが考えられ、その複数性が奥行き反転を抑制することが示唆された。

それでは、どうして複数物体間の（大局的）奥行き順序は、単一物体の（局所的）奥行き構造に比較して奥行き反転しにくいのであろうか。そこになんらかの生態学的あるいは生物学的理由が存在するのであろうか。おそらく、複数物体の奥行き順序を変化させることは視知覚系にとってコストが高いことが予想される。そのコストを説明する要因の一つとして、複数物体の奥行き順序の「自己運動方向の判断」に必要な情報への寄与ということが考えられる。観察者本人が移動すると同時に独立して運動する物体も存在する自然な環境下での自己進行方向の判断に物体の分凝とその奥行き順序が重要であることが計算理論的にも心理物理学的にも報告されている（Hildreth, 1992³⁾; Beusmans and Richards, 1994⁶⁾）。つまり、運動する観察者にとって、光流動からの自己進行方向の知覚は重要な課題であり、それに重要な役割をする物体間の奥行き順序は安定していかねばならないものと考えられる。しかし、これらの考えは未だ推量の域を出ない。この問題の統合的解明のためにも、「光流動による“対象構造”、“対象運動”および“自己運動”の知覚」という大きな枠組みのもとで、さらなる研究が必要である。

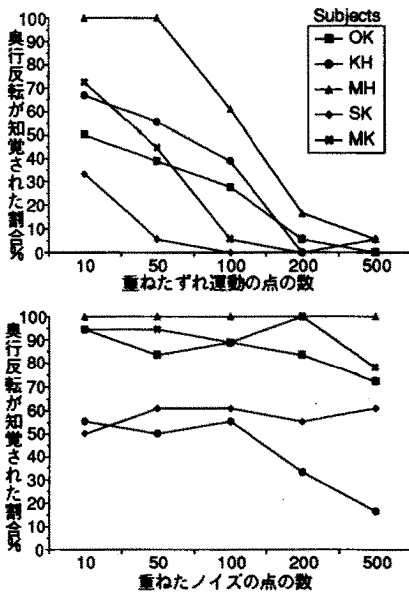


図5 実験3の結果。上は複数物体条件での結果、下はノイズ条件での結果。ともに、奥行き反転が知覚された割合を操作した点の数（密度）に対してプロットした。複数物体条件では、点の密度が上がるに従って奥行き反転が生じにくくなったが、ノイズ条件では、一人の被験者をのぞいてあまり変化はなかった。

文献

- 1) K. Nakayama: Biological image motion processing: a review. *Vision Research*, 25, 625-660, 1985.
- 2) J. J. Gibson: What gives rise to the perception of motion? *Psychological Review*, 75, 335-346, 1968.
- 3) H. Ono and M. J. Steinbach: Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception and Psychophysics*, 48, 179-187, 1990.
- 4) B. Rogers and M. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134, 1979.
- 5) E. C. Hildreth: Recovering heading for visually-guided navigation. *Vision Research*, 32, 1177-1192, 1992.
- 6) J. M. H. Beusmans and W. A. Richards: Object-based perception of ego-motion. *Perception*, 23 Supplement, 19B, 1994.