

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

鷗 沼 秀 行*・Kellman, Philip J.**・長谷川 桐***

Consideration of Geometric and Neurophysiological Models of Visual Interpolation

UNUMA, Hideyuki, KELLMAN, Philip J. and HASEGAWA, Hisa

Abstract

This paper aims to present an overall theoretical framework of the process of visual interpolation. A psychophysical or geometric model, Kellman & Shipley (1991), and several neural or neurophysiological models are discussed. From the early extraction of edges and junctions to the higher process of boundary assignment and figure-ground perception, several issues are emphasized to explain visual interpolation. Amodal and modal completion in illusory contour perception are discussed from the viewpoint of the geometric model. The boundary interpolation process suggested from the geometric model is compared with several neural models. Generality of the notion of *relatability* and identity hypothesis and its extension to the spatio-temporal domain are suggested. It is also suggested that geometric and neurophysiological modeling approaches serve complementary functions.

Key Words: visual interpolation, amodal and modal completion, illusory contour, psychophysical models, neural models

*教授 知覚・認知心理学

** University of California, Los Angeles

*** 青山学院大学大学院文学研究科博士後期課程

序

近年の視覚研究の急速な進展は、これまでの理論体系に新たな展開をもたらしつつある。その方向は、今まで以上に現実の生態学的環境を視野に入れながら、神経生理学的モデルと情報処理モデルを総合しつつ、より体系的に視覚システムをとらえようとしているように見える。本稿は、視覚的補間 (visual interpolation) の問題をめぐって、最近の生態学的研究から特に幾何学的モデル (geometric model) を取り上げるとともに、それらと近年注目される広義の神経生理学的モデル (neurophysiological model) のいくつかとの関係を論じることとする。なお、ここでは工学的ないわゆる神経回路網モデル (neural network model) および計算論的モデル (computational theory) と、生体の脳の構造と機能を直接検証しようとする狭義の神経生理学的モデルの双方を広い意味での神経生理学のアプローチとして一括して論じる。

さて現在、視覚的補間の問題は視覚システム研究の全体の中でどのように位置づけられるであろうか。視覚システムの課題を、2次元の光学的配列 (網膜像) から3次元空間における対象の知覚を達成することと考える立場 (たとえば, Marr, 1982) に立つと、視覚システムはつぎのような一連の情報処理過程によってこの課題を達成していると仮定することができる。

最近までの視覚皮質に関する生物学的知見 (Hubel & Wiesel, 1959, 1968; Livingstone & Hubel, 1987; Hubel, 1995) をもとにすれば、まず人間の視覚系は網膜像から光刺激の輝度などの変化を縁 (edge ; 以下, エッジ) あるいは接合 (junction) として検出する。エッジとは輝度の急激な変化だけではなく、色相やテクスチュア, 運動や両眼視差など, さまざまな刺激次元での変化を含む。検出されたエッジは相互に統合されて輪郭線 (contour) が成立する。ただし、これによって成立した複数の輪郭は一般に外界における対象間の遮蔽関係などの影響を受けて不連続であり、たとえ外界において連続した物理的輪郭線であっても、そのエッジから構成された複数の輪郭が連続であるかどうかは自明ではない。この段階で、Gestalt心理学が主張した古典的な群化 (grouping) の法則に代表される体制化の法則にしたがって複数の輪郭線の間が補間され、異なる対象間の境界線が成立すると考えられる (boundary interpolation)。

また接合 (junction) とは、輪郭線の方法が一意に決まらない点を指す。具体的には、複数の輪郭が接している点、あるいは輪郭が急激 (不連続) に方向を変える点がこれにあたる。なお Kellman と Shipley (1991) は、このような不連続なエッジや輪郭の接合が対象の分節 (segmentation) と群化 (grouping) に重要な働きをもつとして、これらを包括的に「接線不連続点」 (tangent discontinuities; TDs) と呼んだ。

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

さらに、3次元空間内における対象の知覚に至る過程では、これらのエッジや接合の検出に基づくエッジの分類 (edge classification) が重要となる。これは遮蔽関係を表すエッジ (occluding edge) を特定することを意味しており、その結果は境界がどの領域に属するかを基本的に決定する (boundary assignment)。すなわち図と地 (figure and ground) が成立し、輪郭は図の側に属するものとして知覚される。一般にT型の接合 (T-junction) が境界の割り当てに有効な情報を提供することが知られている。

一方、これらエッジや接合の処理と並列的に色、肌理 (texture)、運動 (motion) などの対象表面の特性 (surface properties) が検出されると仮定することができる (Palmer, 1999; Shipley & Kellman, 2001)。局所的な可視領域の表面特性は境界線によって決定された領域に拡散 (spreading) し、対象表面の視覚的表現 (representation) を形成する。このような境界線の補間と表面特性の拡散が総合されることによって、はじめて対象の統一的な表現 (representation of object unity) が可能となる。これがその後の処理への入力となり、3次元空間内におけるいわゆる「形 (shape)」の視覚的表現を成立させると考えられる。

このような一連の情報処理過程は、ひとまず網膜への光刺激の投射に始まる bottom-up の過程としてとらえることができる。しかし、「形」の成立は知識などのより高次の記憶過程の影響を受け、また特に図と地 (figure and ground) の成立は一般に多義的であり、図への境界線の割り当ても「形」の成立の影響を受ける。したがって境界線の成立・割り当て (boundary assignment) は、高次過程からのフィードバックという top-down の過程を含むものとして仮定する必要がある。

次に、上述したような境界線の補間と表面特性の拡散による視覚的補間 (visual interpolation) を説明するために、どのようなモデルが提案されているかをみることにしよう。

視覚的補間とその幾何学的モデルおよび神経生理学的モデル

視覚的補間と対象の知覚の成立を説明しようとするモデルは、大きく2つに分けることができる。1つは、対象の知覚が成立するための刺激の空間的あるいは時間的關係を問題とするアプローチである。これには Gestalt 心理学が取り上げた体制化の法則についての議論が大きく寄与している。上述の情報処理過程の文脈では、複数の輪郭線が統合され、表面特性の拡散によって対象の表現が成立する際の、これら知覚の手がかりの空間的・時間的關係を明らかにしようとする立場といえよう。Kellman, Guttman と Wickens (2001) は、この立場から提案されたモデルを幾何学的モデル (geometric model) と呼んだ。刺激および刺激間の関係と知覚成立との間の關係を追求するという点で、精神物理学的モデル (psychophysical model) のひ

とつと考えることができよう。

これに対して、広い意味での神経生理学的モデル (neurophysiological model) と呼ぶことができる一群のモデルがある。このなかには、先に述べた狭義の生物学的研究に直接関連する脳、特に視覚皮質に関するモデル (Hubel & Wiesel, 1959, 1968, Livingstone & Hubel, 1987) のほかに、これら狭義の神経生理学的研究が明らかにした制約を根拠として、計算論的な立場 (computational theory) から対象知覚成立のメカニズムを数理的ないし工学的にモデル化しようとするアプローチがある。後者は一連の演算子 (operator) の操作によって情報処理過程をモデル化するとともに、シミュレーションによってその論理を検証しようとするものであるが、一方で生物学的な構造・機能を数理的・工学的に実現しようとすることからニューラルモデル (neural model) とも呼ばれる。この立場からは膨大なモデルが提案されているが、本稿では特に視覚的補間についての生物学的知見との対応が比較的明確であり、またシミュレーションが知覚的現象を比較的忠実に再現していると思われる最近のモデルに限定して取り上げることとする。また狭義の神経生理学的研究についても、これらのニューラルモデルと関連するものを中心に言及するものとする。

以下では、個々の具体的モデルについて議論をはじめることにして、まず幾何学的モデルについて、Kellman と Shipley (1991) およびその関連するモデルを中心に考えることにする。

視覚的補間の幾何学的モデル

視覚的補間は、上述したように生理学的知見を根拠として、境界線を補間する過程と表面特性が拡散する過程の2つに分けることができる。Kellmanらはこれらをそれぞれ、境界補間過程 (boundary interpolation process) と表面補間過程 (surface interpolation process) と呼んだ (Kellman & Shipley, 1991; Yin, Kellman, & Shipley, 1997)。ここではまず境界補間過程についての具体的なモデルを検討することで、幾何学的モデルの可能性について考察する。

境界の補間

Kellman と Shipley (1991) において、境界補間過程は彼らが接線不連続性 (tangent discontinuities: TDs) と呼ぶ2つのエッジの空間的位置関係、正確にはエッジ端点における方向 (接線) の変化の程度 (微分係数) によって異なる結果を生みだす、とされた。具体的に見てみよう。Figure 1(a) において2つのエッジ E1 および E2 は楕円に遮蔽され、その下で連続して知覚される。境界の補間が成立していると言える。これに対して Figure 1(b) では、2つのエッ

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

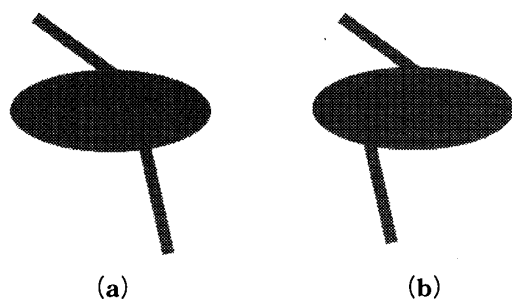


Figure 1. Examples of edges which show relatability constraint. Edges are interpolated and occluded by an ellipse in display (a). But they are not interpolated in (b). (After Kellman & Shipley, (1991).)

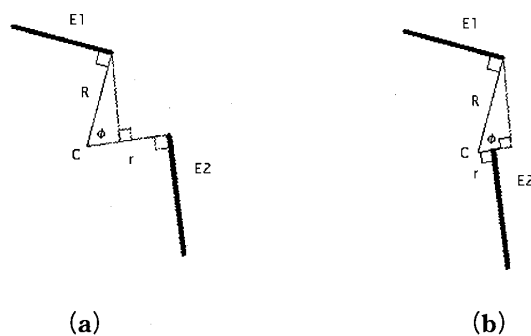


Figure 2. Geometric relationship for defining whether two edges (E1, E2) are relatable (a) or not (b). (After Kellman & Shipley, (1991).)

ジは連続しては知覚されない。Kellmanらは、この事態で2つのエッジが視覚的に補間されるための空間的位置関係に関する次のようなモデルを提案した。Figure 2において、各エッジの端点における垂線が交点Cにおいて角度 ϕ で交わっている。エッジE1およびエッジE2の端点からの交点Cまでの距離をそれぞれRおよびrとする($r \leq R$)と、境界補間が成立する必要十分条件は、

$$0 \leq R \cos \phi < r$$

であるという。これは ϕ が 90° を超えないことを要求すると同時に、他方でE1の端点からE2の垂線へおろした垂線の足が、E2の端点の外にまで越えることがないという制約条件を表している。この条件下で、E1とE2の間の不連続はそれぞれのエッジの方向に矛盾しないようになだらかに補間される。境界補間が成立するためのこの空間的關係は「関係づけ可能性 (relatability)」と呼ばれた (Kellman & Shipley, 1991, 1992)。

「関係づけ可能性」の概念については現在までいくつかの方向でその一般性に関する検討が行われてきた。「関係づけ可能性」は上記の条件で悉無的に成立するものでなく、エッジ間の角度が直線的關係から 90° までの範囲で変化するときこれに応じて「関係づけ」られる程度も徐々に減少すること (Kellman & Shipley, 1992)、また曲線のエッジ間の補間においても同様のモデルが適合することが示唆されている (Takeichi, Nakazawa, Murakami, & Shimojo, 1995)。

Fieldら (Field, Hayes, & Hess, 1993) の実験は、「関係づけ可能性」に基づく境界線の補間過程を視覚情報処理過程の中に位置づけるうえで重要である。彼らは、一次視覚野 (V1) の方位選択的な細胞の受容野に対応するガボール・パッチ (Gabor patch) を刺激材料として、

空間的に離れた複数のパッチ間の角度を操作し、それらの中に輪郭線が知覚されるか否かを実験的に検討した。ガボール・パッチは、正弦波をガウス関数で変調したガボール関数にしたがって刺激の輝度分布を空間的（あるいは時間的）に操作したもので、特に一次視覚野の単純型細胞（simple cell）の応答に対応する刺激であることが一般に知られている。Fieldらの結果は、ガボール・パッチ刺激間の角度が「関係づけ可能性」の条件を満たすときに輪郭線が知覚されることを示していた。このことは境界線の補間過程が一次視覚野の単純細胞からの出力をもとにした処理過程のなかで成立すること、また「関係づけ可能性」がこのような初期視覚（early vision）における境界線補間のモデルとして妥当であることを示唆している。

「関係づけ可能性」のアイデアは知覚の体制化について Gestalt 心理学が提案した「よい連続（good continuation）」の要因に関連している。すでに Wertheimer（1923/1958）は知覚体制化の原則の中で、「近接（proximity）」や「類同（similarity）」の要因などと並んで「よい連続の要因」をあげ、輪郭線の連続により体制化が規定されることを定性的に示していた。しかしその後、長い間この「よい連続」は具体的に定義されることはなく、定性的な概念にとどまっていた。Kellman と Shipley（1991）のモデルは、この「良い連続」を定量的に定義し検証可能な概念へと発展させるとともに、体制化を具体的に予測可能にした点で評価されるわけである。

Kellman らのモデルが主張するもうひとつの論点は、それまで別個の現象と考えられてきふたつの現象の背後に、「関係づけ可能性」に基礎をおく同一の過程があることを主張する点である。すなわち、一般に遮蔽物の「背後」でエッジが連続して知覚される現象と、輪郭線や明るさの知覚などの感覚属性をともなって経験される錯視的輪郭（illusory contour）ないし主観的輪郭（subjective contour）と呼ばれる現象が、同一の機制にもとづくことが仮定されている。前者の現象は「非感性的補完（amodal completion）」と呼ばれ、後者は「感性的補完（modal completion）」と呼ばれてきた。Kellman らの仮説によれば、両者とも「関係づけ可能性」の制約を満たす複数のエッジが補間された後、さらに接合などによる奥行き配置やそれにもとづく整合的な境界の割り当てが決定されることで、遮蔽された非感性的補完か、あるいは錯視的な感性的補完が成立する。彼らはこれを「同一性仮説（identity hypothesis）」と呼んだ（Kellman & Shipley, 1991）。

このような同一の機制がふたつの現象を説明しうることは、Figure 3 のような自発的分割対象（spontaneously-splitting object）あるいは自己分割対象（self-splitting object）と呼ばれる図形配置においてしばしば示される（Kellman & Shipley, 1991）。楕円が手前に見えるときには円弧は感性的に補完されるのに対し、長方形が手前に見えるときにはその辺が感性的に補間

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

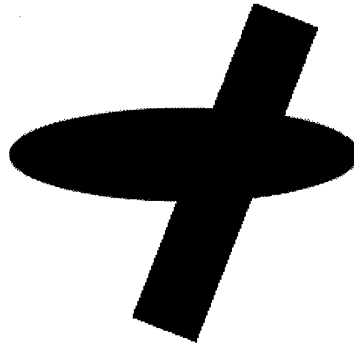


Figure 3. An example of a spontaneously-splitting object. This figure is typically seen as an ellipse and a rectangle. When an ellipse is perceived as interpolated behind the rectangle, the illusory sides of the rectangle are perceived around the center of the figure. But when the rectangle is perceived behind the ellipse, illusory arc can be completed. (After Kellman & Shipley, (1991).)

され、楕円は遮蔽されて非感性的に補完されて見える。すなわち同一のエッジによる境界の補完が異なる現象として観察されるわけである。ここでは表面特性の補間がエッジの補間とは別の水準で生じることも示唆されている。

表面の補間

表面補間過程は境界補間過程とは独立に進行すると考えられる。すなわち上述の境界補間過程は色や肌理などの表面特性の類似性にもとづく処理とは独立に輪郭を補間しようとするという実験的根拠が報告されている (Kellman & Loukidies, 1987; Kellman & Shipley, 1991; Shipley & Gordon, 1987; Shipley & Kellman, 1992 a)。このことはエッジの補間が Gestalt 心理学のいうところの類同 (similarity) の要因によって規定されるものではないことを示唆している。

しかしこのことは表面特性の類似性が一般に視覚的補間に影響を与えないことを意味するわけではない。表面特性は補間された境界の内部に拡散し (spreading), 両者は総合されることで視覚的補間が成立する。すなわち、その境界が遮蔽された非感性的補完を生じる場合には表面特性は拡散しないが、感性的補完によって錯視的輪郭が成立する場合にはその領域内に拡散する。

ここまで視覚的補間に関する幾何学的モデルについて検討を加えてきた。次にエッジと接合の検出、および輪郭の統合についての広義の神経生理学的モデルを取り上げて、それらと狭義の神経生理学的知見および幾何学的モデルとの関係について考察することにしよう。

鵜沼秀行・Kellman, Philip J.・長谷川 桐

神経生理学的モデル

神経生理学的なメカニズムを前提とした計算理論の立場からのいわゆるニューラルモデルの中から、ここではまずエッジと接合の検出を中心に Heitger らのモデル (Heitger, Rosenthaler, von der Heydt, Peterhans, & Kubler, 1992) を取り上げる。さらに輪郭の統合について Yen と Finkel (1998) および Heitger らの拡張されたモデル (Heitger, von der Heydt, Peterhans, Rosenthaler, & Kubler, 1998) について検討する。これらはいずれもまず一次視覚野の単純型細胞の受容野に対応したフィルターを仮定しており、それらが特定の方位あるいは空間周波数をもった局所的な刺激のコントラストに反応するとされる点で共通する。

エッジと接合の検出

エッジと接合の検出、さらには輪郭線の不連続を検出する過程は、神経生理学的には単純型細胞から複雑型細胞 (complex cell), 超複雑型細胞 (hyper-complex cell) へといたる一次視覚野において実現されていると考えられる (Hubel & Wiesel, 1959)。超複雑型細胞は現在ではむしろ端点停止型細胞 (end-stopped cell) として理解されており、これは計算理論の観点から特に重要な役割を果たすと考えられる。端点停止型細胞は受容野内の線分刺激には強く反応するが、これを超える長さの線分に対しては反応を抑制する。すなわち、エッジの端点に対して選択的に反応すると考えられる。その結果、端点停止型細胞は線分の端点や曲線あるいは角に対して敏感であると言える (Hubel, 1995)。以下では、このような神経生理学的な知見をもとに計算理論的アプローチがどのようにエッジや接合の検出をモデル化しているかを Heitger ら (1992) を例に考えることにしよう。

モデルの最初の段階は一次視覚野の単純型細胞の機能 (Hubel & Wiesel, 1968) に対応する S 演算子 (S-operators) である。これは空間内の特定の位置における方位選択的なフィルターで、 30° ステップで6対の演算子が仮定される。各対は奇関数と偶関数の2種のガボール関数で近似され、それぞれエッジと線分の検出器として想定される。

第二段階では複雑型細胞に対応する C 演算子 (C-operators) が S 演算子の反応を総合する。すなわち、C 演算子は S 演算子よりも広い受容野に対応し、受容野における線分やエッジの方向に反応するが、詳細な位置や明暗の方向 (明→暗あるいは暗→明) には鈍感である。具体的には、C 演算子の出力は S 演算子における奇関数と偶関数の反応の2乗和の平方根として定義される。また刺激が線分であるかエッジであるかについての情報は、奇関数型 S 演算子と偶関数型 S 演算子の出力を相対的に比較することで保持される。

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

第三段階では、C演算子からの出力をもとに端点停止型演算子（end-stopped operators）がエッジや線分の端点、角や曲線の表現を形成する。これは同一の方位特性をもつ隣接した2つないし3つのC演算子の出力差によって達成される。具体的にみると、端点停止型演算子にはさらに2つの型が区別される。一つは単一停止型演算子（single-stopped operators）と呼ばれ、一つの興奮領域と一つの抑制領域からなり、2つの領域の間に端点をもつ線分に最も強く反応する。もう一つの型は二重停止型演算子（double-stopped operators）と呼ばれ、中心に一つの興奮領域を持ち、その両側に二つの抑制領域を持つ。これは小さな円に最も強く反応する。これらの端点停止型演算子はS演算子やC演算子と同様に30°の方位ごとに仮定されている。

Heitgerら（1992）のモデルの最終段階は「キー・ポイント（key-points）」と呼ばれる。これは単一停止型演算子と二重停止型演算子の出力の和が極大値に達する位置をさす。これらの演算子をもとにシミュレーションをおこなった結果、キー・ポイントはエッジや線分の接合によく対応したという。彼らはキー・ポイントの多くが遮蔽関係にあるエッジに対応すると仮定しており、これをエッジ間の補間過程への入力と考えている。

キー・ポイントは、単一停止型および二重停止型演算子からの入力によって規定される。一般に二重停止型演算子は曲線状のエッジを検出し、単一型停止型演算子はエッジの端点の方向を示す。したがってこれら端点停止型演算子の出力は、前述したエッジの分類において有効であると考えられるわけである。

Heitgerら（1992）のモデルは、仮定される各演算子が脳の視覚野に対件（correlates）を持つとみなすことができる点で優れていると言えよう。さらに各演算子の特性は、実際の視覚システムの機能をよく反映している。また最終的なシミュレーションの結果も、エッジや接合とうまく対応している点で評価できる。しかしながら、次のような問題点を指摘することができる。彼らのモデルの検証に用いられた刺激セットが非常に限定されたもの（2種類）で、例えば前述した幾何学的モデルにおける精神物理学的なデータとの対応は不明である。また検出されたエッジや接合がどのように補間されて輪郭線が成立するかについては説明が不十分と言える。次に、輪郭の統合に関するニューラルモデルを取り上げることにしよう。

輪郭の統合

局所的な方位についての処理から輪郭線全体が構成される過程についての近年の神経生理学的研究は、なんらかの形で視覚情報処理の初期の段階での神経細胞相互の横方向の（水平方向の）結合を示唆している（Polat & Sagi, 1993; Kapadia, Ito, Gilbert, & Westheimer, 1995）。特に異なる領域間で類似の方位選択性をもった神経細胞間の相互作用が生じることによって、輪郭

線全体が同時に処理される可能性が指摘されている。その具体的方策として神経活動の単純な促進のほかに、発火パタンの相関や神経活動の同期の検出が提案されている (Livingstone, 1996)。

Yen と Finkel (1998) は、計算理論の立場から一次視覚野の方位選択性をもった神経細胞に類似したフィルターを仮定し、これらの活動間の時間的な同期によって輪郭線が統合されるとするモデルを提案した。具体的には、偶関数型と奇関数型の受容野を持つ一対のフィルターを仮定し、それらの出力を以下の3種の「水平結合 (horizontal connections)」によって統合するモデルである。第一の促進的結合は「同軸結合 (co-axial connections)」と呼ばれ、神経細胞の選択的方位の軸方向から楕円状に拡散する結合強度の勾配を仮定する。ここでの結合強度はこの円弧からの距離、方位のずれにしたがって急速に減少する。第二の結合は「水平結合 (trans-axial connections)」と呼ばれ、平行な受容野をもつ神経細胞間での結合をさす。これもそれらの距離と方位のずれにしたがって強度を減少させる。第三の結合は上記の2種の結合が安定した後の段階で機能すると仮定され、一定の閾以下の活動を抑制することで輪郭線の信号を背景のノイズから検出しやすくする。

Yen らのモデルでは輪郭の統合は、輪郭の要素に関連する神経ユニット間の同期 (synchronization) によって規定されると仮定される。そのモデルとしての特徴は、モデル構成が比較的単純でありパラメータが少ないこと、さらにいくつかの精神物理学的データとの対応という点でも優れていること (Kovacs & Julesz, 1993; Polat & Sagi, 1993, 1994) である。また、さきに述べた Field ら (1993) のデータと類似する結果もシミュレートできる点は、視覚的補間の幾何学的モデルとの対応を考える上でも興味深い。

ただし、Yen らのモデルは輝度エッジのみに入力を限定していること、したがって錯視的に補間された輪郭の説明は考慮されていないことは注意しておきたい。つまり一次視覚野のモデルとしては優れてはいるものの、より高次の視覚的補間のモデルとしては問題を残しているといえよう。

これに対して、Heitger ら (1998) のモデルでは、前述した Heitger ら (1992) における複数のキー・ポイントの間で、単一停止型演算子の出力をもとに群化 (grouping) を成立させる群化演算子 (grouping operators) が加えられた。さらにこの群化では、並列群化 (para grouping) と直交群化 (ortho grouping) が区別された。並列群化とはキー・ポイントにおける単一停止型演算子が検出した端点を持つ線分の方向にそった群化である。これに対して直交群化とは検出された線分の端点からこれに直交する方向に生ずる群化である。Figure 4(a) は並列群化によってキー・ポイントにおける線分の軸の方位にそって群化が生じ、錯視的輪郭線

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

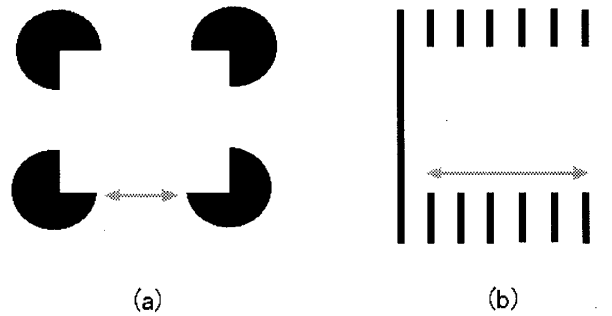


Figure 4. Two examples of the grouping of key points in the Heitger et al. (1998) model: (a) para grouping; (b) ortho grouping. (After Heitger et al., (1998).)

が補間されることを示している。(b)では、直交群化によって端点において線分の軸と直交する方向に群化が生じて錯視的輪郭が成立することが示されている。

このような群化演算子の出力は、一方でC演算子からの出力である物理的なエッジや線分の検出と総合されて輪郭を成立させる。さらにこの群化演算子は、成立する境界の割り当てにも寄与する。すなわち、キー・ポイントにおける端点停止演算子の出力が入力線分と直交関係に近い場合 (Figure 4(b) 参照) には一般に遮蔽関係が成立し、演算子の入力となった端点を持つ線分は遮蔽されて背後に定位され、出力された輪郭は遮蔽する側の対象の境界となる。

以上みてきたように、拡張されたHeitgerら (1998) のモデルは、Heitgerら (1992) と同じように脳の視覚野の構造と機能にもよく対応している。群化演算子については、複数のキー・ポイント間の群化過程と対応するように、二次視覚野 (V2) において錯視的輪郭に反応する神経細胞が見いだされている (Peterhans & von der Heydt, 1989)。一方このモデルは、他のニューラルモデルにも共通する一般性を持つと言える。群化演算子に仮定された並列群化と直交群化の考え方は、Yen と Finkel (1998) における同軸結合と水平結合に類似している。

しかしながら、Heitgerら (1998) に代表される高次の演算子を仮定するニューラルモデルにも、現時点でいくつかの問題点・課題を指摘することができる。次にこれまで取り上げてきたモデルの今後の課題について考えることにしよう。

幾何学的モデルと神経生理学的モデルの課題

神経生理学的モデルの課題

神経生理学的知見を制約としていわゆるニューラルモデルを構築しようとするアプローチに

は、Heitgerら(1998)のように高次の演算子を仮定することで輪郭線の補間を説明しようとするモデル以外に、エッジからの入力を受けたユニットからの直接的な促進によって隣接するユニットが活性化することで輪郭線が補間されると仮定するモデルがある(Polat & Sagi, 1993)。YenとFinkel(1998)もこの点では後者のモデルに分類することが適切であろう。これらのモデルは、視覚情報処理の初期のユニット間における「水平」の結合、すなわち直接的な活性化の促進・拡散を仮定する点で、「ネットワークモデル(network model)」の一種と考えることができよう。では、高次演算子モデルとネットワークモデルのいずれが、視覚的補間のモデルとして適切であろうか。以下ではこれら二種のモデルについて、それぞれの問題点について考えることにする。

Heitgerら(1998)のモデルでは、直線状に配列されたエッジは並列群化過程によって補間される。しかしながら、ゆるやかな曲線状の補間は想定されていない。これに対して幾何学的モデルにおける精神物理学的データはゆるやかな曲線状の補間を示唆しており(Kellman & Shipley, 1991; Field, Hays, & Hess, 1993), Heitgerら(1998)はこのことを説明していない。一方、直交群化過程では 30° までの範囲で群化の「許容」範囲を仮定しているが、説明としては不十分であろう(Kellman, Guttman, & Wickens, 2001)。すでに述べたように、群化演算子については二次視覚野における単一細胞の電気生理的な記録に基づく生理学的な根拠(Petershans & von der Heydt, 1989)に対応することを認めることができるが、その演算子の特性については十分な実験的検証が行われているとは言いがたい。

一方、ネットワークモデルは高次演算子モデルよりも視覚的補間をより簡潔に説明することが可能であるようにみえる。しかしネットワークモデルに関しても、次のような問題点を指摘することができよう。もし視覚的補間による錯視的輪郭の補間が、エッジの検出などと同じ水準の初期処理で行われているのなら、物理的な輪郭と錯視的輪郭の知覚的差異はどのようにして説明されるであろうか。さらに、成立する輪郭線の境界への割り当ては、図と地の成立や自発的分割図形の例でみたように一般に多義的である。このような境界の決定がエッジの検出からどのような過程で成立するかについてネットワークモデルは有効な説明を提供していないと言えよう。

このように、現段階では視覚的補間の説明として高次演算子モデルとネットワークモデルのいずれが有効であるかを決定することは困難である。では、計算理論からの神経生理学的モデルは、今後どのような課題を解決する方向でモデル化をすすめるべきであろうか。以下では、幾何学的モデルと神経生理学的モデルの総合という観点で、神経生理学的モデルの今後の方向を探ることにしよう。

神経生理学的モデルと幾何学的モデルの総合

幾何学的モデルが取り上げる現象の中で、神経生理学的モデルがほとんど扱っていない現象に、遮蔽された輪郭と錯視的・感性的に補間された輪郭の同時的成立ないし交代がある。先に述べたように Kellman ら (1991) の「同一性の仮説」においては、遮蔽された輪郭と錯視的輪郭の両者は同一の過程によって生成され、接合や境界の割り当てを規定する情報および両者の奥行き関係に関する情報に基づいて、一方は遮蔽された輪郭として、他方は錯視的輪郭として成立するとされた。すなわち、遮蔽される輪郭についての処理は、最終的に錯視的輪郭としての知覚が成立する前にこれらの情報をもとに処理が遮断されると考えられる。視覚的補間におけるこのような「処理遮断の効果 (ゲーティング効果: gating effect)」と、奥行きの定位によって補間される輪郭の知覚的性質が変化する「奥行き配置効果 (depth ordering effect)」は、Heitger ら (1998) においては考慮されていない。視覚的補間において遮蔽と奥行きの成立は、視覚的補間機能を生態学的な観点から考える際にも極めて重要な現象であると言えよう。

幾何学的モデルが取り上げるもう一つの一般的かつ重要な現象に、視覚的補間が成立する際の物理的なエッジの長さとお互いのギャップ (gap: 間隙) の大きさについての規則性がある。例えば Figure 3(a) のような刺激配置で、物理的なエッジのそれらの間隙に対する長さの比率が減少するにつれて、視覚的補間の程度は線形に減少することが見出されている (Banton & Levi, 1992; Shipley & Kellman, 1992 b)。Shipley と Kellman (1992) はこのエッジとギャップの関係を「支持比率 (support ratio)」という概念で生態学的に位置づけようと試みている。すなわち、観察距離が変化しても対象の「支持比率」は変化しない。このような観察距離によらない不変な (invariant) 刺激変数を抽出することは視覚システムが環境に適応するためには大きな意味を持ちうると言えよう。Heitger ら (1998) のモデルにおいて、群化演算子は網膜像の大きさに規定された処理を行うため「観察距離不変」ではない。したがって幾何学的モデルが提案する支持比率に対応するためには、群化演算子の入力部分ないしは機構全体の修正が必要になると思われる。

以上のように、神経生理学的モデルが幾何学的モデルと総合されて、より生態学的に妥当性の高いモデルとなるためには、少なくとも「処理の遮断」と「奥行き配置」の効果を取り入れること、また「支持比率」にみられる「観察距離不変」の処理を可能にすることの2点が必要であると考えられる。

幾何学的モデルの課題

最後に、幾何学的モデルにおける今後の課題について考えてみることは必要であろう。Kellmanら (Kellman, Guttman, & Wickens, 2001) は幾何学的モデルが解決すべき具体的課題として、次の4点をあげている。すなわち、並列輪郭の不整列 (misalignment of parallel contour) における視覚的補間の問題、エッジの関係づけ可能性と最終的な輪郭線知覚の差異、視覚的補間における高次過程からの top-down の影響、そして3次元空間における視覚的補間および時空間情報を含めたモデル化の問題、である。これらの課題についての検討の現状を整理してみることにしよう。

並列輪郭の不整列とは、具体的には平行なエッジが同一延長線上に整列していない状態で、これは Figure 2(a) では E1 と E2 が平行で隔てられており、しかも同一線上に位置しない、すなわち不整列な状態である。関係づけ可能性の点からは、このようなエッジは結び付けられず視覚的補間は成立しないはずであるが、実際には視覚的補間が成立することがある。これに対しては、このような事態での不整列に対する耐性 (tolerance) を仮定すること、すなわち不整列の検出に閾 (threshold) を仮定することが提案されている (Shipley & Kellman, 1992 a)。

エッジ間関係づけ可能性と最終的な輪郭線の知覚の差異については、すでに述べたように関係づけ可能性の充足が必ずしも錯視的輪郭線の知覚を成立させる十分条件ではない、と考えることができる。すなわち、整合的な境界の割り当てや奥行き配置の情報との総合が最終的な知覚の成立を決定することになり、その要件が満たされない場合には処理が遮断 (gating) されるという仮説は、視覚的補間にひとつの説明を提案しているようにみえるが、これにはいくつかの検討の余地が残されているように思われる。

奥行き情報や境界割り当てが一次視覚野や二次視覚野における初期視覚過程において並列的に処理され、それらがエッジの空間的配置についての処理と総合されるとする仮説は、現在でも検討の余地がある。これに対して奥行き配置や境界割り当てからのフィードバックがエッジ・接合検出へフィードバックされるとする仮説は、現在の神経生理学的モデルや幾何学的モデルのいくつかがとる立場である。境界割り当て過程と表面補間過程および境界補間の関係は今後に残された重要な検討課題であろう (Yin, Kellman, & Shipley, 1997)。

さて、幾何学的モデルの第三の課題である視覚的補間への高次過程からの影響には、いわゆる top-down 処理の問題と全体処理に関わる問題がある。具体的な要因としては、親近性 (familiarity), 規則性 (regularity), 対称性 (symmetry) などがあげられる。このうち top-down 処理として親近性と規則性の高い「形」が境界の割り当てに影響することはすでに指摘されてきた (Peterson, 1994; Peterson & Gibson, 1994)。これに対して対称性のような全体的

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

特性が視覚的補完 (visual completion) に影響することも報告されている (Sekular, Palmer, & Flynn, 1994) が, Kellman らは感性的補完すなわち錯視的輪郭は対称性の影響を受けないという (Kellman, Guttman, & Wickens, 2001)。これらの現象の差異は, 局所的処理と全体的処理の区別という観点で整理される可能性が指摘されている (Kellman, Temesvary, Palmer, & Shipley, 2000)。

3次元および時空間次元での視覚的補間の問題について述べることにしよう。視覚システムには奥行きや時空間次元での関係を抽出する機能が実装されているという見解は, さまざまな立場から支持されている (Gibson, 1979; Marr, 1982)。視覚的補間に関しても, 3次元さらには時空間次元での補間へと理論を拡張することは必要であろう。Kellman らは2次元での「関係づけ可能性」仮説を3次元空間に拡張する提案を行った (Kellman, Machado, Shipley, & Li, 1996)。

さらに時空間次元における視覚的補間については, Palmer, Kellman と Shipley (1997, 2000) が「空間的更新仮説 (spatial updating hypothesis)」を提案した。これは遮蔽された対象の速度情報を用いて対象の位置を更新するという仮説である。また, Unuma らは時空間的に不連続なエッジが一定の時間範囲で統合されて錯視的輪郭が知覚される現象をもとに, 視覚的補間の時間的特性の検討を行ってきた (Unuma & Tozawa, 1994; 鶴沼, 1997; Palmer, Unuma, & Kellman, 1999; Unuma & Hasegawa, 2002)。これらは幾何学的モデルの新たな展開を目標とするものであり, 一方で近年の脳科学が取り組むバインディング問題 (binding problem) に関連することも示唆されており, 幾何学的モデルと神経生理学的モデルの新たな総合をめざすものとも言える。

結 び

本論文は, 最近の視覚的補間をめぐる幾何学的モデルと神経生理学的モデルを比較し, それぞれの特徴・課題を明らかにしながら両者を総合する方向を具体的に提示してきた。われわれの提案は, 処理される情報とその計算過程, そして神経生理学的メカニズムという異なる水準での理解が必要であり, さらにそれらが総合されることが可能であるという点にある。これによってわれわれの視覚システム全体についての理解がより一貫したものに進展することを期待したい。

謝 辞

本研究は、第一著者に対する平成16年度川村学園女子大学教育研究奨励の補助を受けた。

引用文献

- Banton, T., & Levi, D. M. 1992, "The perceived strength of illusory contours.", *Perception & Psychophysics*, **52**, pp.676-684.
- Field, D., Hayes, A., & Hess, R. F. 1993, "Contour integration by the human visual system: Evidence for a local association field.", *Vision Research*, **33**, pp.173-193.
- Gibson, J. J. 1979 *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton-Mifflin. (古崎敬 他訳, 1985, ギブソン『生態学的視覚論—ヒトの視覚世界を探る—』, サイエンス社)
- Heitger, F., Rosenthaler, L., von der Heydt, R., Peterhans, E., & Kübler, O. 1992, "Simulation of neural contour mechanisms: From simple to end-stopped cells.", *Vision Research*, **32**, pp.963-981.
- Heitger, F., von der Heydt, R., Peterhans, E., Rosenthaler, L., & Kübler, O. 1998, "Simulation of neural contour mechanisms: Representing anomalous contours.", *Image and Vision Computing*, **16**, pp.407-421.
- Hubel, D. H. 1995, *Eye, Brain and Vision*. Scientific American Library, No. 22., WH Freeman, NY.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. 1959, "Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex.", *Journal of Physiology*, **148**, pp.574-591.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. 1968, "Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex.", *Journal of Physiology*, **195**, pp.215-243.
- Kapadia, M. K., Ito, M., Gilbert, C. D., & Westheimer, G. 1995, "Improvement in visual sensitivity by changes in local context: Parallel studies in human observers and in V1 of alert monkeys.", *Neuron*, **15**, pp.843-856.
- Kellman, P. J., Guttman, S., & Wickens, T.D. 2001, "Geometric and neural models of object perception.", In T. F. Shipley & P. J. Kellman (Eds.), *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision*. Oxford, UK: Elsevier Science Publishers.
- Kellman, P. J., & Loukides, M. G. 1987, "An object perception approach to static and kinetic subjective contours.", In S. Petry & G. E. Meyer (Eds.), *The perception of illusory contours* (pp.151-164) New York: Springer-Verlag.
- Kellman, P. J., Machado, L. J., Shipley, T. F., & Li, C. C. 1996, "3-D determinants of object completion.", *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **37**, S685.
- Kellman, P. J., & Shipley, T. F. 1991, "A theory of visual interpolation in object perception.", *Cognitive Psychology*, **23**, pp.141-221.
- Kellman, P. J., & Shipley, T. F. 1992, "Visual interpolation in object perception.", *Current Directions in Psychological Science*, **1**(6), pp.193-199.
- Kellman, P. J., Temesvary, A., Palmer, E. M., & Shipley, T. F. 2000, "Separating local and global processes in object perception: Evidence from an edge localization paradigm.", *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **41**(4), S741.
- Kellman, P. J., Yin, C., & Shipley, T. F. 1998, "A common mechanism for illusory and occluded object comple-

視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル

- tion.”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, pp.859–869.
- Kovács, I., & Julesz, B. 1993, “A closed curve is much more than an incomplete one: Effect of closure in figure-ground segmentation.”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **90**, pp.7495–7497.
- Livingstone, M. S. 1996, “Oscillatory firing and interneuronal correlations in squirrel monkey striate cortex.”, *Journal of Neurophysiology*, **75**, pp.2467–2485.
- Livingstone & Hubel, 1987, “Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth.”, *Journal of Neuroscience*, **7**(11), pp.3416–3468.
- Marr, D. 1982 *Vision*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. (乾敏郎 安藤広志 訳, 1987, 『ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現—』, 産業図書)
- Palmer, E. M., Kellman, P. J., & Shipley, T. F. 1997, “Spatiotemporal relatability in dynamic object completion.”, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **38**(4), S256.
- Palmer, E. M., Kellman, P. J., & Shipley, T.F. 2000, “Modal and amodal perception of dynamically occluded objects.”, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **41**(4), S439.
- Palmer, E. M., Unuma, H., & Kellman, P. J. 1999, May “Spatiotemporal illusory contour perception.”, Poster presented at The Annual Meeting of the *Association for Research in Vision and Ophthalmology (ARVO)* Ft. Lauderdale, Florida.
- Palmer, S. 1999, *Vision science: Photons to phenomenology*. MIT Press.
- Peterhans, E., & von der Heydt, R. 1989, “Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. II. Contours bridging gaps.”, *Journal of Neuroscience*, **9**, pp.1749–1763.
- Peterson, M. A. 1994, “Object recognition processes can and do operate before figure-ground organization.”, *Current Directions in Psychological Science*, **3**(4), pp.105–111.
- Peterson, M. A., & Gibson, B. S. 1994, “Must figure-ground organization precede object recognition? An assumption in peril.”, *Psychological Science*, **5**, pp.253–259.
- Polat, U., & Sagi, D. 1993, “Lateral interactions between spatial channels: Suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments.”, *Vision Research*, **33**, pp.993–999.
- Polat, U., & Sagi, D. 1994, “The architecture of perceptual spatial interactions.”, *Vision Research*, **34**, pp.73–78.
- Sekuler, A. B., Palmer, S. E., & Flynn, C. 1994, “Local and global processes in visual completion.”, *Psychological Science*, **5**, pp.260–267.
- Shapley, R., & Gordon, J. 1987, The existence of interpolated illusory contours depends on contrast and spatial separation. In S. Petry & G. E. Meyer (Eds.), *The perception of illusory contours* (pp.109–115) New York: Springer-Verlag.
- Shipley, T. F., & Kellman, P. J. 1992a, “Perception of partly occluded objects and illusory figures: Evidence for an identity hypothesis.”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, pp.106–120.
- Shipley, T. F., & Kellman, P. J. 1992b, “Strength of visual interpolation depends on the ratio of physically specified to total edge length.”, *Perception & Psychophysics*, **52**, pp.97–106.
- Shipley, T. F., & Kellman, P. J. 2001, *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision*. Oxford, UK: Elsevier Science Publishers.
- Takeichi, H., Nakazawa, H., Murakami, I., & Shimojo, S. 1995, “The theory of the curvature-constraint line

鵜沼秀行・Kellman, Philip J.・長谷川 桐

- for amodal completion.” *Perception*, **24**, pp.373–389.
- 鵜沼秀行, 1997, 「主観的輪郭線の知覚」(長縄, 椎名, 川崎編『認知心理学の視点—理論と測定法—』ナカニシヤ出版, pp.75–93)
- Unuma, H. & Tozawa, J. 1994, “Perception of illusory contour and spatio-temporal integration in the visual system”, *Japanese Psychological Research*, **36**, 3, pp.188–194
- Unuma, H. & Hasegawa, H. 2002, “Spatio-temporal interpolation and perception of illusory contour. 25th European Conference on Visual Perception.”, *Perception*, **31**, supplement, 73
- Wertheimer, M. 1958, “Principles of perceptual organization.”, In D. C. Beardslee & M. Wertheimer (Eds.), *Readings in perception*. Princeton, NJ: Van Nostrand. (Original work published 1923)
- Yen, S. C., & Finkel, L. H. 1998, “Extraction of perceptually salient contours by striate cortical networks.”, *Vision Research*, **38**, pp.719–741.
- Yin, C., Kellman, P. J., & Shipley, T. F. 1997, “Surface completion complements boundary interpolation in the visual integration of partly occluded objects.”, *Perception*, **26**, pp.1459–1479.