

両眼非対応特徴に基づく遮蔽面の形成

黒木, 大一郎
九州大学大学院人間環境学府

<https://doi.org/10.15017/8022>

出版情報 : 九州大学心理学研究. 7, pp.97-105, 2006-03-31. 九州大学大学院人間環境学研究院
バージョン :
権利関係 :

両眼非対応特徴に基づく遮蔽面の形成

黒木大 一朗¹⁾ 九州大学大学院人間環境学府

Construction of occluding surfaces based on binocularly unmatched features

Daiichiro Kuroki (*Graduate school of human-environment studies, Kyushu university*)

When an opaque object occludes a distant surface, visual areas that can be seen monocularly (monocular zone) arise. Retinal images in such monocular zones are called as binocularly unmatched features. I categorized several types of the stereopsis based on unmatched features, and reviewed the role of unmatched features in binocular stereopsis. It is known that occlusion as well as slant produces the same retinal images. Therefore, I discussed how the visual system differentiates unmatched features arisen from occlusion and slant. Finally, I discussed a common mechanism between the stereopsis based on unmatched features and conventional disparity-based stereopsis. I conclude that binocularly unmatched features are effective cues to depth perception and construction of occluding surfaces, in which occlusion constraint, depth constraint zone, and minimum slant constraint play an important role.

Keywords: binocularly unmatched features, monocular zone, stereopsis, review

1. はじめに

我々が知覚している3次元空間では、不透明な物体がその背景の一部を単眼に対してのみ遮蔽している。例えば、Fig.1において背景上のAの領域は左眼からは観察できるが、右眼からは不透明な面によって遮蔽されているために観察できない。このように私たちの視野内には、単眼でしか見ることのできない視野領域が存在する。この領域のことを単眼領域 (monocular zone), あるいは半遮蔽領域 (half occlusion zone) と呼ぶ (本稿では単眼領域と呼ぶ)。また、単眼領域の網膜像は、両眼間で対応する特徴がないので両眼非対応特徴 (binocularly unmatched feature, 以下、非対応特徴) と呼ばれている。近年、視覚系が非対応特徴に基づいて3次元の空間構造を復元することが可能であることが明らかとなった (例えば, Anderson, 1994; Nakayama & Shimojo, 1990; Gillam, Blackburn, & Nakayama, 1999; Gillam & Nakayama, 1999)。従来、両眼立体視²⁾の手がかりとして焦点があてられてきたのは水平網膜像差 (以下、網膜

像差)であった。網膜像差とは両眼間で対応する特徴の網膜上での位置の差であるため、非対応特徴には、網膜像差の概念を適用することができない。したがって、新たに注目されることになった奥行きがかりとしての非対応特徴が、空間構造の復元においてどのような役割を担っているのか、また非対応特徴の処理過程が網膜像差の処

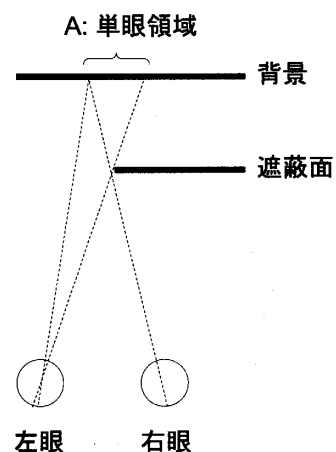


Fig.1 単眼領域と両眼非対応特徴

背景上のAの領域は左眼からは観察できるが、右眼からは不透明な面によって遮蔽されているために観察できない。Aの領域を(左眼)単眼領域と呼ぶ。また、単眼領域の網膜像は両眼間で対応のない特徴であることから両眼非対応特徴と呼ばれる。

¹⁾ 本稿を作成するにあたり、ご指導いただき、査読していただいた九州大学人間環境学研究院の中溝幸夫教授、三浦佳世教授に深く感謝いたします。また有意義なコメントをいただいたATR人間情報科学研究所(日本学術振興会特別研究員)の光藤宏行氏に深く感謝いたします。

²⁾ 従来、両眼立体視は網膜像差に基づいた立体視と等価に扱われてきたが、本稿では、両眼性の奥行きがかりとして網膜像差以外に非対応特徴があることを前提として、両眼立体視を両眼性の奥行きがかりに基づいた立体視という広義の意味を表す言葉として用いる。

理過程とどのように異なるのかを再考する必要がある。

視覚系が非対応特徴から3次元空間構造を復元する処理過程において重要な役割を果たす拘束条件が、遮蔽拘束条件 (occlusion constraint; Shimojo & Nakayama, 1990), および奥行拘束領域 (depth constraint zone; Nakayama & Shimojo, 1990) である。遮蔽拘束条件を満たしている構造とは、非対応特徴が生態学的に妥当な位置に (左眼の非対応特徴が遮蔽面の左側に、右眼の非対応特徴が遮蔽面の右側に) 存在している構造のことを言う。遮蔽拘束条件を満たされない場合には、非対応特徴に基づく立体視は成立しないこと (Nakayama & Shimojo, 1990) や、左右眼のどちらで遮蔽拘束条件を満たされているのかという情報が3次元の空間構造を決定すること (Gillam et al., 1999) が報告されている。また遮蔽拘束条件を満たしている状況では非対応特徴が視野闘争を免れて知覚されることが報告されている (Shimojo & Nakayama, 1990)。一方、奥行拘束領域とは、遮蔽面と非対応特徴の位置関係が遮蔽拘束条件を満たし得る3次元上の空間領域のことを言う。Nakayama & Shimojo (1990) は、非対応特徴が奥行拘束領域内の最も遮蔽面に近い位置に定位されることを報告している。また、Pianta & Gillam (2003a) は奥行拘束領域内で面の傾きが最小となる構造が知覚されることを報告している。

本稿の目的は、非対応特徴が生み出す視覚過程とその結果に関する研究を概観し、視覚系がどのような状況下で非対応特徴を奥行き手がかりとして利用できるのか、また非対応特徴の両眼立体視における役割はどのようなものなのかを明らかにすることである。さらにそれらの知識に基づいて、視覚系における非対応特徴の処理メカニズムを解明するための示唆を与えることである。本稿では、今日までに報告された非対応特徴に基づくいくつかの立体視をその特性ごとに分類することから始める (2章)。次に非対応特徴が両眼立体視に及ぼす効果について述べる (3章)。さらに、同じ網膜像差を生み出し得る3次元空間構造の「遮蔽」と「傾き」を、視覚系がどのように区別しているのかについて述べる (4章)。最後に、非対応特徴に基づく立体視と網膜像差に基づく立体視の共通機構を示す (5章)。

2. 非対応特徴に基づく立体視の分類

2.1 主観的輪郭をもつ遮蔽面の形成

非対応特徴に基づく立体視の興味深い点として、奥行が知覚されるだけでなく、主観的輪郭をもつ遮蔽面が知覚されることが挙げられる。この現象に関するいくつかの知見を以下に述べる³⁾。

Nakayama & Shimojo (1990) は、網膜像差をもつランダムドットの中から特定のドットを単眼においてのみ削除したステレオグラム (Fig.2a) を両眼融合したときに、単眼で観察しているドットに沿って主観的輪郭が知覚されることを報告した。また手前に知覚されるドット

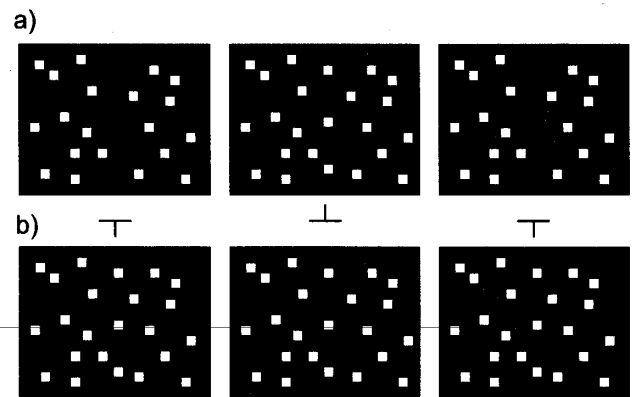


Fig.2 主観的輪郭が生じるダ・ヴィンチステレオグラム (Nakayama & Shimojo, 1990) を模した図

a) のステレオグラムにおいて、交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、主観的輪郭が単眼のみで観察できる中央のドットに沿って知覚され、手前に知覚されるドットの間の空白領域が、背景面を遮蔽する平らな面に見えるように知覚的に補完される。一方、b) のステレオグラムを同様に両眼融合した場合、主観的輪郭、および補完は観察されない。

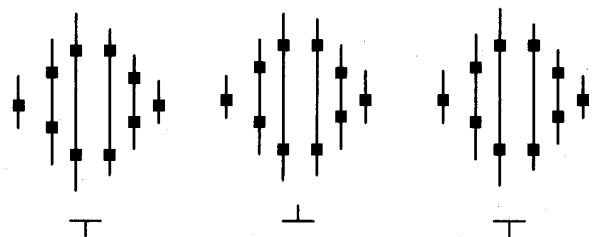


Fig.3 Anderson (1994) のステレオグラムを模した図

交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、垂直線分を囲んだ主観的な輪郭をもつ遮蔽面が観察される。各垂直線分上のドットは、誤った両眼対応をとらないようにするために付加してある。

³⁾ 2.1節で報告した立体視以外にも Gillam & Grove (2004), Malik, Anderson, & Charowhas (1999), Cook & Gillam (2004) が主観的輪郭をもつ遮蔽面を形成する同様の立体視を報告している。

⁴⁾ Nakayama & Shimojo (1990) はダ・ヴィンチ立体視を生み出すステレオグラムとして2種類のステレオグラムを報告している。もう1つのステレオグラムに関しては2.2節で紹介する。

の間の空白領域が、背景面を遮蔽する平らな面に見えるように知覚的に補完されることも指摘した。一方、Fig.2bを両眼融合した場合、主観的輪郭は知覚されず、ドット間の空白領域が補完されて遮蔽面が観察されることもないと主張している。Fig.2aとbの違いは、単眼で観察されるドット（非対応特徴）が存在するかどうかだけであり、知覚される3次元空間構造の違いは、非対応特徴によって生み出されていると考えられる。この立体視は、レオナルド・ダ・ヴィンチが初めて報告した観察条件であることから、ダ・ヴィンチ立体視と名づけられた⁴⁾。

Anderson (1994) は、長さの異なる垂直線分からなるステレオグラム (Fig.3) を観察したときに、垂直線分の周りに主観的輪郭をもち背景面を遮蔽する面が知覚されることを見出した。このステレオグラムにおける垂直線分の長さの違いは垂直網膜像差とも、非対応特徴とも解釈することが可能である。もし視覚系が垂直線分の長さのずれを垂直網膜像差として解釈した場合、線分の両端が両眼間で対応していると考えられ、このステレオグラムを両眼融合すると前額平行面よりわずかに傾いた垂直線分が知覚されると予測される。しかし、実際にこのステレオグラムを両眼融合するとそのような知覚は得られず、垂直線分を囲む主観的な輪郭をもつ遮蔽面が観察される。つまり、視覚系は線分の長さの違いを、垂直網膜像差としてではなく、遮蔽によって生じる非対応特徴として解釈するのである。また Anderson (1994) は、複数の線分が存在することは遮蔽面を形成するための必要条件ではなく、一本の垂直線分でも遮蔽面は形成されると主張している (例えば、Fig.4aを両眼融合したときに垂直線分の上下に斜めに傾いた主観的輪郭をもつ遮蔽面を知覚することができる)。Anderson (1994) のステレオグラムと Nakayama & Shimojo (1990) のダ・ヴィンチステレオグラムとの違いは、(a)前者では被遮蔽物 (垂直線分) の一部分が単眼において遮蔽されているのに対し、後者では被遮蔽物 (ドット) の全てが単眼において遮蔽されている点と、(b)前者では1本の垂直線分から遮蔽面が形成されるのに対し、後者では1個のドットからは遮蔽面が形成されない点である (Fig.4参照)。このことから、被遮蔽物の一部分が単眼において遮蔽されている場合に、視覚系は非対応特徴を遮蔽面形成のための手がかりとしてより効率的に利用することができると考えられる。

Gillam & Nakayama (1999) は、2本の垂直線分から

構成され、その1つの垂直線分の中央部分に単眼においてのみ観察できるギャップをもつステレオグラム (Fig.5) を両眼融合すると、長方形の主観的輪郭に囲まれた遮蔽面 (ファントム面) が知覚されることを報告した。この立体視は、ステレオグラムには存在しない架空の遮蔽面が知覚されることからファントム立体視と名づけられた⁵⁾。ファントム立体視では、遮蔽拘束条件を満たす複数の遮蔽面が幾何学的に定義でき、ファントム面の知覚奥行量は拘束条件を満たす最小の奥行量よりも大きくなることが報告されている (Gillam & Nakayama, 1999; Grove, Gillam, & Ono, 2002; 黒木・中溝, 2004)。これは、ファントム立体視においては幾何学的には奥行拘束領域のみが決まり、ファントム面の位置を一意に決

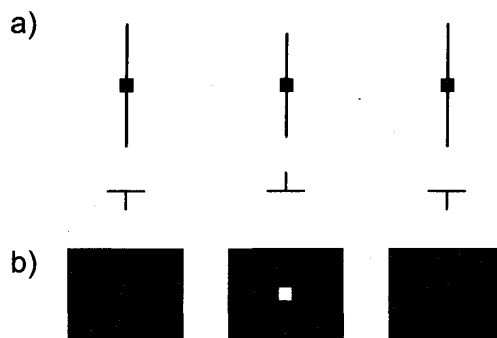


Fig.4 Anderson (1994) のステレオグラムとダ・ヴィンチステレオグラム (Nakayama & Shimojo, 1990) の比較

a) のステレオグラムにおいて、交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、垂直線分の上下に斜めに傾いた主観的輪郭をもつ遮蔽面が知覚される。一方、b) のステレオグラムを両眼融合しても主観的輪郭をもつ遮蔽面は知覚されない。a) は Anderson (1994) のステレオグラムの構成要素で、b) は Nakayama & Shimojo (1990) のステレオグラムの構成要素である。

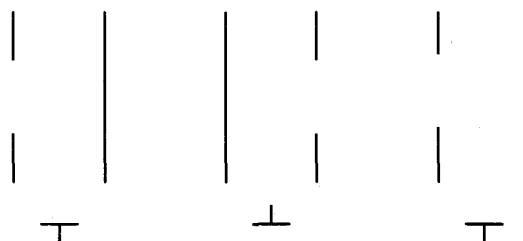


Fig.5 ファントムステレオグラム (Gillam & Nakayama, 1999) を模した図

交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、長方形の主観的輪郭に囲まれた遮蔽面 (ファントム面) が、2本の垂直線分の手前に知覚される。

⁵⁾ 元々ファントム立体視は Liu, Stevenson, & Schor (1994) によって報告されたが、その後の研究により彼らのファントムステレオグラムには従来の網膜像差立体視と同様な奥行手がかりが含まれていることが明らかとなった (Gillam, 1995; Liu, Stevenson, & Schor, 1997)。

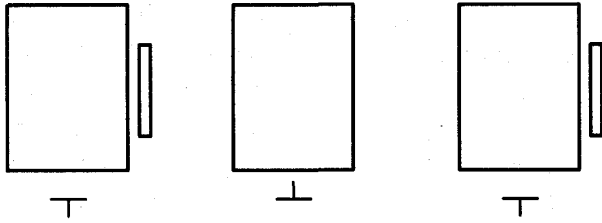


Fig.6 非対応特徴が遮蔽面の奥に定位されるダ・ヴィンチステレオグラム (Nakayama & Shimojo, 1990) を模した図

交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると, 垂直線分が遮蔽面の奥に定位される。一方, 交差法で右と中央の図を (非交差法で左と中央の図を) 両眼融合すると, 遮蔽拘束条件を満たさないために, 遮蔽面と垂直線分との間に奥行が知覚されない。

めることができないため, 視覚系はさらに何らかの拘束条件を必要とするが, それは最小奥行拘束条件 (minimum depth constraint) ではないことを示している。視覚系がどのような拘束条件をファントム立体視に適用しているかは明らかになっていないが, この問題については, Mitsudo, Nakamizo, & Ono (2005) によって解決の糸口が示唆されており, 彼らはファントム面の視覚探索課題を行い, ファントム面の大きな奥行が注意などの高次な視覚過程において生じるものではなく, 初期視覚過程において生成されていることを示唆する証拠を報告している。また, ファントム立体視の知覚奥行量は網膜像差に基づく立体視のそれと異なり個人差が大きいことも知られており, このこともファントム立体視における拘束条件を特定することを困難にしている。

2.2 両眼対応特徴と非対応特徴との間に奥行が知覚される場合 (ダ・ヴィンチ立体視)

Nakayama & Shimojo (1990) のダ・ヴィンチステレオグラム (Fig.6) を両眼融合すると, 非対応特徴である垂直線分 (被遮蔽物) が, 両眼対応特徴である長方形の面 (遮蔽面) の後方に定位される。ダ・ヴィンチ立体視では幾何学的には奥行拘束領域のみを決めることができ, 遮蔽面と非対応特徴との間の奥行を一意に決めることはできない。奥行拘束領域はダ・ヴィンチステレオグラム (Fig.6) において両眼対応特徴 (長方形の面) と非対応特徴 (線分) の間の距離を増加させると遮蔽面の後方に移動する。もし視覚系が奥行拘束領域に基づいて奥行を出力しているのであれば, 両眼対応特徴と非対応

特徴との間の距離の増加とともに遮蔽面と非対応特徴との間の知覚奥行量が増加すると予測される。Nakayama & Shimojo (1990) はこの予測と一致する実験結果を得た。この結果は非対応特徴が奥行の前後関係の情報のみを与える「質的な」奥行手がかりではなく, 「量的な」奥行手がかりであることを示唆している。

しかしながら, ダ・ヴィンチ立体視の刺激条件下において, 非対応特徴が量的な奥行手がかりであるという主張を支持しない実験結果も得られている。例えば, Shimojo, Tam, & Nakamizo (1999) は Nakayama & Shimojo (1990) の刺激と類似した刺激や, より多くの実験参加者を用いた実験を行い (Nakayama & Shimojo が3名の実験参加者であるのに対し, Shimojo et al.は16名の実験参加者), 非対応特徴は遮蔽面の後方に定位されるが, 遮蔽面と非対応特徴との間の知覚奥行量は両眼対応特徴と非対応特徴との間の距離の変化に依存していないことを報告した。さらに Shimojo et al. (1999) は, ノニウスラインを使って統制した理論的な輻輳の位置と, 実際の輻輳の位置との誤差が非対応特徴の定位に影響することも報告しており, Nakayama & Shimojo (1990) の実験で得られた量的な奥行が輻輳の誤差によるものである可能性を指摘している。また, Gillam, Cook, & Blackburn (2003) は非対応特徴として遮蔽面のエッジと両眼対応をとりにくい円形刺激を用いて Nakayama & Shimojo (1990) と同様の実験を行い, 円形の非対応特徴が遮蔽面の後方に定位されるが, 遮蔽面と非対応特徴との間の知覚奥行量は両眼対応特徴と非対応特徴との間の距離の変化に依存していないことを報告した。これらの結果から, ダ・ヴィンチ立体視の刺激条件下における非対応特徴は奥行の前後関係の情報のみを与える「質的な」奥行手がかりであると考えられる。

2.3 単眼ギャップ立体視 (Monocular gap stereopsis)

単眼ギャップ立体視 (Gillam et al., 1999; Pianta & Gillam, 2003a) とは, 片眼に長方形を呈示し, その長方形の半分の幅をもつ2つの長方形とそれらの間に背景と同じ色と輝度をもつ垂直線分をギャップとして挿入したものをもう一方の眼に呈示したときに, 2つの隣り合った前額平行面の間に奥行が知覚される現象である (Fig.7a)⁶⁾。仮に視覚系が刺激全体を囲むエッジの網膜像差に基づいて奥行を出力しているとする, 中央のギャップ部分に視野闘争が生じ, 前額平行面から傾いた面が知覚されると予測されるが, 実際の知覚はこれと異なる。また, 左右どちらの面が手前に知覚されるかはギャップを観察する眼に依存していることも報告されている。Gillam et al. (1999) は (a)ギャップの幅を大きくするほど隣接する前額並行面間の知覚奥行量が増加すること, (b)片眼に呈示されている2つの長方形の幅とギャップ

⁶⁾ 単眼ギャップ立体視は, 元々, Gillam et al. (1999) によって Unpaired background stereopsis と報告されたが, 後に Pianta & Gillam (2003a) によって単眼ギャップ立体視 (Monocular gap stereopsis) と言い換えられた。

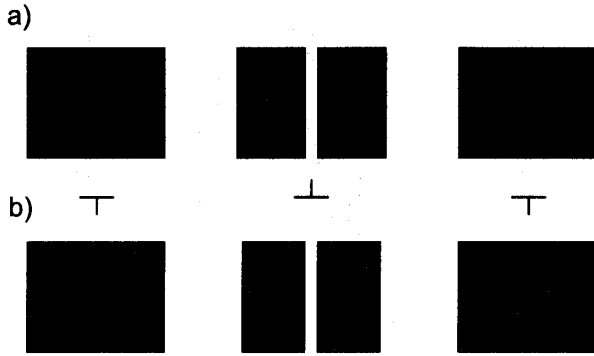


Fig.7 単眼ギャップステレオグラム (Gillam et al., 1999; Pianta & Gillam, 2003a) を模した図

- a) 片眼に呈示されている2つの長方形の幅を足した長さが、もう一方の眼に呈示されている長方形の幅と等しい単眼ギャップステレオグラム。交差法で左と中央の図を（非交差法で右と中央の図を）両眼融合すると、2つの前額平行面が知覚され、右の面が左の面の手前に知覚される。一方、交差法で右と中央の図を（非交差法で左と中央の図を）両眼融合すると、左の面が右の面の手前に知覚される。
- b) 片眼に呈示されている2つの長方形の幅とギャップの幅を足した長さが、もう一方の眼に呈示されている長方形の幅と等しい単眼ギャップステレオグラム。このとき刺激全体を囲む外側のエッジの網膜像差は生じないが、交差法で左と中央の図を（非交差法で右と中央の図を）両眼融合すると、左右2つの面に関して左側のエッジが手前に右側のエッジが奥にあるように傾いて知覚される。

の幅を足した長さが、もう一方の眼に呈示されている長方形の幅と等しいとき（刺激全体を囲む外側のエッジに網膜像差が生じないとき）には、傾いた面が知覚されることを見出した (Fig.7b)。(a)の結果は、ギャップの幅が従来の網膜像差と類似した役割を担っていること、(b)の結果は、視覚系が刺激全体を囲むエッジの網膜像差のみに基づいて奥行を復元しているわけではないことを示している。したがって、単眼ギャップ立体視は、両眼立体視において視覚系が必ずしも局所的な網膜像差の処理を必要とせずに面を復元することが可能であることを示唆している。

Pianta & Gillam (2003a) はどのような拘束条件を適用すると単眼ギャップ立体視の知覚を説明できるかを、片眼に呈示されている1つの長方形の幅を変えること、及びギャップの形状を変えることによって調べた。その結果、視覚系は面の傾きを最小とする拘束条件 (minimum slant constraint) を適用することによって、奥行を出力していることを示した。また、Gillam et al. (1999) が報告した単眼ギャップ立体視では、片眼で観察される1つの面は2つの面が内側のエッジで接している状況を示していたが、Pianta & Gillam (2003a) は片眼で観察される1つの面がもう一方の眼で観察される2つの面が

“重なり合っている状況”を示している場合であっても視覚系が面を復元できることを示した。

3. 両眼立体視における非対応特徴の役割

3.1 奥行知覚が成立するまでの時間に及ぼす非対応特徴の効果

Gillam & Borsting (1988) は、生態学的に妥当な位置に存在する（遮蔽拘束条件を満たす）非対応特徴は奥行知覚を促進するという仮説を立て、この仮説を支持する結果を得た。彼らは、左右に隣接した長方形の面の間に奥行を知覚するようなランダムドットステレオグラム（以下、RDS）を作成し、単眼領域内に非対応特徴としてドットを挿入した条件と、単眼領域を空白にした条件とで奥行が知覚されるまでの時間を測定した。その結果、前者の条件下において奥行知覚までの時間が短くなった。このことは視覚系が奥行手がかりとして非対応特徴を利用することで、3次元空間構造を迅速に復元することが可能であることを示唆している。

しかしながら、Howard & Rogers (1995) は、単眼領域と背景面の類似性が奥行知覚を促進するという別の仮説を立て、Gillam & Borsting (1988) の結果だけからは、Howard & Rogers (1995) と Gillam & Borsting (1988) のどちらの仮説が正しいかを決定できないことを主張した。そこで Grove & Ono (1999) は、2つの仮説を検証する実験を行った。彼らは刺激としてRDSを用い、(a)単眼領域を空白にした条件、(b)単眼領域を背景と類似したドットで満たした条件、(c)単眼領域を背景のドット密度より高いドット密度で満たした条件を設けて、奥行が知覚されるまでの時間を測定した。その結果、条件(c)と比較して条件(a)と(b)において奥行が知覚されるまでの時間が短くなった。この結果はGillam & Borsting (1988) の仮説とも Howard & Rogers (1995) の仮説とも一致しない結果であった。なぜなら、Gillam & Borsting (1988) の仮説が正しければ、条件(a)と比較して条件(b)と(c)において奥行知覚までの時間が短くなるはずであり、Howard & Rogers (1995) の仮説が正しければ、条件(a)と(c)と比較して条件(b)において奥行知覚までの時間が短くなるはずだからである。Grove & Ono (1999) は、Nakayama & Shimojo (1992) が提案した一般の見え (generic view) と偶発的見え (accidental view) という考えを用いてこの現象を説明した。一般の見えとは、視点を変えたときに網膜像が現在の網膜像から極端に変化しない空間構造を指し、偶発的見えとは、ある視点からでないかと与えられた網膜像が生じない空間構造を指す。この考えに従うと、条件(c)のように単眼領域と背景が著しく異なるような空間構造は偶発的な見えと言える。Grove & Ono (1999) は偶発的見え

において奥行が知覚されるまでの時間が長くなると結論している。

3.2 知覚奥行量に及ぼす非対応特徴の効果

Grove et al. (2002) は Grove & Ono (1999) と同様の方法を用いて、非対応特徴が知覚奥行量に及ぼす効果を調べた。彼らは RDS, 単眼ギャップステレオグラム (Gillam et al., 1999), 及びファントムステレオグラム (Gillam & Nakayama, 1999) を用いて、(a) 単眼領域が空白である条件、(b) 単眼領域が背景と類似している条件、(c) 単眼領域が背景と類似していない条件のそれぞれにおいて各ステレオグラムの知覚奥行量を測定した。その結果、条件 (c) において知覚奥行量が減少することが分かった。これはテクスチャの変化が生じている視野領域が単眼領域と偶然に一致するような、いわば生態学的には起りにくい状況では遮蔽情報を弱め、さらに他の奥行手がかりの情報も減衰させることを示している。

3.3 ステレオキャプチャ

Häkkinen & Nyman (2001) は、ファントムステレオグラム (Gillam & Nakayama, 1999) を用いて、非対応特徴に基づいて形成される主観的輪郭をもつ遮蔽面 (ファントム面) が両眼対応特徴であるドットを捕獲して、ドットを遮蔽面と同じ奥行に定位することを報告した。彼らのステレオグラムには両眼対応特徴であるドットが2次元上に等間隔に配置されていたため、各ドットは複数の両眼対応を取ることができ、その奥行情報は曖昧になる。Häkkinen & Nyman (2001) の結果は、非対応特徴に基づいて奥行が復元された後に、曖昧な奥行情報をもつ両眼対応特徴であるドットの定位が行われることを示しており、非対応特徴に基づく立体視が初期段階の奥行処理過程を統合するメカニズムであることを示唆している。

4. 遮蔽面の知覚と傾きの知覚

ある状況では遮蔽されている物体の両眼網膜像と奥行方向に傾いた物体の両眼網膜像とが等しくなる。視覚系は、入力された網膜像が、遮蔽によって生じたものなのか、あるいはある物体が傾いているために生じたものなのかをどのように見分けているのであろうか。例えば、Fig.8のステレオグラム (Nakayama & Shimojo, 1992) を観察した場合、幾何学的には (a) 2つの独立した長方形の面 (水平方向に長い長方形と垂直方向に長い長方形の面) が中央で奥行をもって交差している構造とも、(b) 十字の物体の水平方向に長い長方形の面が傾いている構造とも解釈できる。しかしながら、このステレオグラムを観察した大部分の実験参加者は (b) ではなく、(a) の知覚 (遮蔽) を報告した (Nakayama, & Shimojo, 1992)。

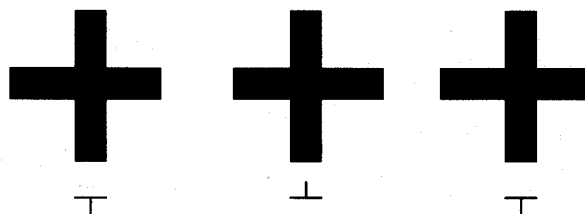


Fig.8 Nakayama & Shimojo (1992) のステレオグラムを模した図

交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、水平方向に長い長方形の面が垂直方向に長い長方形の面の手前に知覚される。

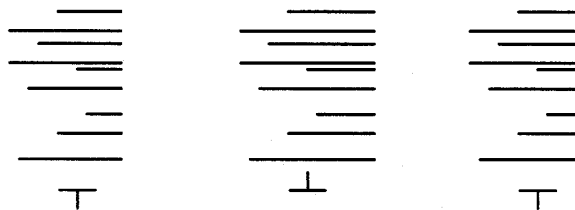


Fig.9 Gillam & Grove (2004) のステレオグラムを模した図

交差法で左と中央の図を (非交差法で右と中央の図を) 両眼融合すると、水平線分の右端に沿って主観的輪郭を持つ遮蔽面が形成される。一方、交差法で右と中央の図を (非交差法で左と中央の図を) 両眼融合すると、水平線分のそれぞれが様々な角度に傾いて知覚される。

Nakayama & Shimojo (1992) は一般的見え (generic view) と偶発的見え (accidental view) という概念を用いてこの現象を説明した。(a) と (b) の状況を比較すると、(a) の状況の一般的見えが Fig.8 のステレオグラムと一致するために、視覚系は (a) の知覚を生み出すと結論している。

一方、Gillam & Grove (2004) は、一般的見えと偶発的見え (Nakayama & Shimojo, 1992) による説明ではなく、視覚系が物体を構成する要素の整列や大きさなどの大域的 (global) な情報を用いて、遮蔽か傾きかを決定しているという新しい仮説を提案している。Fig.9 は彼らが実験に用いたステレオグラムである。このステレオグラムでは、視覚系が局所的な網膜像差情報のみを処理しているとするそれぞれの線分が様々な角度に傾いて知覚される。しかしながら、Fig.9 のステレオグラムにおいて、交差法で左と中央の図を、または非交差法で右と中央の図を両眼融合した場合、水平線分の右端に

沿って主観的輪郭を持つ遮蔽面が知覚される。Gillam & Grove (2004) は、Fig.9のステレオグラムを観察したときに、(a)線分の右端が整列していること、(b)それぞれの線分の長さが両眼間で等距離だけ異なること、(c)非対応特徴が遮蔽拘束条件を満たしていることの3つの大域的な情報を処理することによって、視覚系が遮蔽の空間構造を復元していると主張した。一方、これら3つの大域的な情報が満たされない場合、視覚系が傾きの空間構造を復元することが明らかとなっている。例えば、Fig.9のステレオグラムにおいて、交差法で右と中央の図を、または非交差法で左と中央の図を両眼融合すると、水平線分のそれぞれが様々な角度に傾いて知覚される。これは、条件(c)が満たされていないからであると考えられる。

5. 非対応特徴に基づく立体視と網膜像差に基づく立体視の共通機構

Pianta & Gillam (2003b) は、1つの共通したメカニズムで非対応特徴と網膜像差が処理されているのか、または網膜像差の奥行き手がかりが存在しないときのみ、非対応特徴が奥行き手がかりとして処理されるのかという2つの仮説を検証した。彼らは単眼ギャップステレオグラム (Gillam et al., 1999; Pianta & Gillam, 2003a) と、それに酷似した網膜像差を生み出すステレオグラム (2つの長方形の間に両眼間で幅の異なるギャップが挿入されているもの) を用いて、交差順応法を用いて実験を行った。交差順応法とは、あるメカニズムの順応効果がもうひとつのメカニズムに影響するかどうかを調べる方法であり、順応効果が得られた場合、2つのメカニズムが共通していると言える。Pianta & Gillam (2003b) は、単眼ギャップステレオグラムに順応した場合も、網膜像差をもつステレオグラムに順応した場合も、順応後に呈示されたゼロ網膜像差をもつ刺激を観察したときに、順応時の奥行と反対の奥行が観察されることを見出した。この結果は非対応特徴と網膜像差の処理が1つの共通したメカニズムに基づいて行われており、非対応特徴に基づいた奥行信号の強度が網膜像差に基づいたそれと類似していることを示唆している。

さらに、ファントム立体視が網膜像差に基づく立体視と同様に絶対距離情報に基づいて奥行をスケールアップしていることが報告されている (中溝, 2002; 黒木・中溝, 2004)。彼らは刺激として RDS, Liu et al. (1994) のファントムステレオグラム、そして Gillam & Nakayama (1999) のファントムステレオグラムを用いて輻輳角と観察距離を独立変数として各ステレオグラムの知覚奥行量を測定し、知覚奥行量が輻輳角の増加とともに非線形に減少すること、および知覚奥行量が観察距離の増加と

ともに線形に増加することを見出した。これらの結果はファントム立体視が絶対距離情報を用いて奥行をスケールアップしていることを示している。

Pianta & Gillam (2003b)、中溝 (2002)、および黒木・中溝 (2004) の実験では刺激として用いたステレオグラムが限定されているので、彼らの実験結果だけから一般的に、非対応特徴に基づく立体視と網膜像差に基づいた立体視の共通機構の存在を主張することは難しい。今後、その他の非対応特徴に基づく立体視を生み出すステレオグラムを用いた同様の実験を行うことによって、両立体視の共通機構の存在を確認することが求められる。

6. おわりに

網膜に投影される像は2次元の情報であり、その情報だけに基いて3次元空間構造を復元するという視覚系の課題は不良設定問題である。したがって、視覚系は何らかの拘束条件を設けることによってこの不良設定問題を解決していると考えられる。網膜像差立体視においては、観察対象物までの絶対距離情報を用いること (距離拘束条件) で3次元空間構造を幾何学的に一意に決定することができる。一方、非対応特徴に基づく立体視においては、絶対距離情報に基づいて奥行がスケールアップされてはいるが (中溝, 2002; 黒木・中溝, 2004)、絶対距離情報だけでは3次元空間構造を幾何学的に一意に決定することはできない。本稿では、遮蔽拘束条件、奥行拘束領域、および最小傾き拘束条件が非対応特徴に基づく立体視において重要な役割を果たすことを述べた。視覚系は、遮蔽拘束条件や奥行拘束領域を満たさない非対応特徴を入力として受け取っても、奥行を復元することはできないこと (Nakayama & Shimojo, 1990; Gillam & Nakayama, 1999)、また、遮蔽拘束条件や奥行拘束領域を満たしていたとしても、偶発的な空間構造である場合は、視覚系は奥行復元のために遮蔽情報を効果的に利用することができないことが示されている (Grove & Ono, 1999; Grove et al., 2002)。今後の発展的課題として、これらの拘束条件が発達的にどのように獲得されているのかを解明することが挙げられる。

また非対応特徴が網膜像の両眼対応を妨げるようなものではなく、両眼立体視の処理過程に積極的に関与することも特筆すべき点である。今日までに多くの視覚研究者によって、視覚系がどのように両眼間で網膜像の対応をとるのかということ (両眼対応問題) についての研究が行われてきたが (Howard & Rogers, 2002 参照)、これらの研究の中で、非対応特徴は両眼対応問題の解決をより困難にするものと考えられる傾向があった。しかしながら、非対応特徴に基づく立体視が報告されたことによって、視覚系が非対応特徴を積極的に奥行情報として

利用していることが示された。Anderson (1994) は視覚系の重要な役割は、両眼網膜像の情報から網膜像差と非対応特徴を抽出し、両眼で観察可能な視野領域は網膜像差情報を用いて、また物体が重なり合う境界部分では非対応特徴の情報を用いて3次元の空間構造を復元することだと述べている。

また、網膜像差検出障害(ステレオアノマリー)をもつ人々が、非対応特徴を両眼性の奥行手がかりとして利用している可能性が考えられる。従来、ステレオアノマリーをもつ人々は日常生活において単眼性の奥行手がかり(例えば絵画の手がかりや陰影など)を利用していると考えられていた。しかしながら、両眼性の奥行手がかりとして非対応特徴が重要な役割を果たすことを示す多くの知見は、“ステレオアノマリー”と“両眼性の奥行手がかりを利用できないこと”を等価とみなすことはできないことを示唆している。ステレオアノマリーと非対応特徴に基づく立体視との関係や、ステレオアノマリーと同様な非対応特徴検出障害の有無に関する研究が今後期待される。

引用文献

- Anderson, B. L. (1994). The Role of Partial Occlusion in Stereopsis. *Nature*, **367**, 365-368.
- Cook, M., & Gillam, B. (2004). Depth of monocular elements in a binocular scene: The conditions for da Vinci stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **30**, 92-103.
- Gillam, B. (1995). Matching needed for stereopsis. *Nature*, **373**, 202-203.
- Gillam, B., Blackburn, S., & Nakayama, K. (1999). Stereopsis based on monocular gaps: Metrical encoding of depth and slant without matching contours. *Vision Research*, **39**, 493-502.
- Gillam, B., & Borsting, E. (1988). The role of monocular regions in stereoscopic displays. *Perception*, **17**, 603-608.
- Gillam, B., Cook, M., & Blackburn, S. (2003). Monocular discs in the occlusion zones of binocular surfaces do not have quantitative depth - a comparison with Panum's limiting case. *Perception*, **32**, 1009-1019.
- Gillam, B., & Grove, P. M. (2004). Slant or occlusion: global factors resolve stereoscopic ambiguity in sets of horizontal lines. *Vision Research*, **44**, 2359-2366.
- Gillam, B., & Nakayama, K. (1999). Quantitative depth for a phantom surface can be based on cyclopean occlusion cues alone. *Vision Research*, **39**, 109-112.
- Grove, P. M., Gillam, B., & Ono, H. (2002). Content and context of monocular regions determine perceived depth in random dot, unpaired background and phantom stereograms. *Vision Research*, **42**, 1859-1870.
- Grove, P. M., & Ono, H. (1999). Ecologically invalid monocular texture leads to longer perceptual latencies in random-dot stereograms. *Perception*, **28**, 627-639.
- Hakkinen, J., & Nyman, G. (2001). Phantom surface captures stereopsis. *Vision Research*, **41**, 187-199.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (1995). *Binocular Vision and Stereopsis*. New York: Oxford University Press.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2002). *Seeing in Depth. Volume 2 Depth Perception*. Ontario, Canada: I. Porteous.
- 黒木大一朗・中溝幸夫 (2004). ファントム立体視に及ぼす輻輳および観察距離の効果. *VISION*, **16**, 69-82.
- (Kuroki, D., & Nakamizo, S. (2004). The effects of convergence and viewing distance on perceived depth of phantom stereopsis. *VISION*, **16**, 69-82.)
- Liu, L., Stevenson, S. B., & Schor, C. M. (1994). Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence. *Nature*, **367**, 66-69.
- Liu, L., Stevenson, S. B., & Schor, C. M. (1997). Binocular matching of dissimilar features in phantom stereopsis. *Vision Research*, **37**, 633-644.
- Malik, J., Anderson, B. L., & Charowhas, C. E. (1999). Stereoscopic occlusion junctions. *Nature Neuroscience*, **2**, 840-843.
- Mitsudo, H., Nakamizo, S., & Ono, H. (2005). Greater depth seen with phantom stereopsis is coded at the early stages of visual processing. *Vision Research*, **45**, 1365-1374.
- 中溝幸夫 (2002). ファントム立体視における輻輳情報を用いた奥行のスケーリング. *VISION*, **14**, 165-168.
- (Nakamizo, S. (2002). Depth scaling of the phantom stereopsis by vergence information. *VISION*, **14**, 165-168.)
- Nakayama, K., & Shimojo, S. (1990). Da Vinci Stereopsis - Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, **30**, 1811-1825.
- Nakayama, K., & Shimojo, S. (1992). Experiencing and perceiving visual surfaces. *Science*, **257**, 1357-1363.
- Pianta, M. J., & Gillam, B. J. (2003a). Monocular gap stereopsis: manipulation of the outer edge disparity and the shape of the gap. *Vision Research*, **43**, 1937-1950.
- Pianta, M. J., & Gillam, B. J. (2003b). Paired and unpaired features can be equally effective in human depth perception. *Vision Research*, **43**, 1-6.
- Shimojo, S., & Nakayama, K. (1990). Real world

occlusion constraints and binocular rivalry. *Vision Research*, **30**, 69-80.

Shimono, K., Tam, W. J., & Nakamizo, S. (1999).

Wheatstone-Panum limiting case: occlusion, camouflage, and vergence-induced disparity cues. *Perception & Psychophysics*, **61**, 445-455.