

多様な情報源からの奥行知覚過程

一川 誠

感性デザイン工学科

視覚系が複数の情報源から奥行情報を得る状況での奥行知覚について、これまでの実験心理学的研究の成果と問題点を概観した。従来の奥行知覚研究では、複数の手がかりから得た奥行情報を統合する過程と、手がかりの間で奥行情報が不一致である事態への順応的変化の過程とが、それぞれ個別に研究されてきた。しかしながら、これら2通りの過程は実際には不可分であり、日常場面での奥行知覚過程を理解するためにはそれらを統一して扱うことが必要である。これまでの研究で得られた知見を踏まえて、奥行情報統合と順応過程の両方を扱うための奥行知覚過程モデルを提案する。

Key Words: *Depth Perception, Multiple Cues, Cue Integration, Adaptation, Strong Fusion Model*

1. はじめに

これまでの実験心理学的研究によって、奥行の知覚に関してどのようなことが明らかにされてきたか、また、現在どのような問題が提起されているのかを概観するのが本論文の目的である。現在の一般的な実験研究では依然ごく限られた(たいていの場合単一の)情報源に基づく奥行知覚の成立過程が調べられている。しかしながら、我々は通常多様な情報源を含む視環境において生活し、その中で奥行知覚を成立させている。したがって、日常生活における奥行知覚の過程を理解するためには、多様な情報源がある際に視覚系がそれらをどのように利用しているのかを知る必要がある。それゆえ、本論では特に多様な情報源が利用可能である状況における奥行情報処理過程についてこれまで何が明らかにされてきたのか整理する。また、今後の奥行知覚研究においてどのような問題が残されているのか展望し、それらを検討するために必要なモデルを提案する。

2. 奥行知覚の問題

人間の視覚系はどのようにして環境の奥行構造についての知覚を成立させているのか。この問題は人間の視知覚に関心を持つ研究者を悩ませてきた。なぜなら、人間の視覚系がその情報の源としている網膜像は2次元的な像であり、観察者から被観察対象までの距離や対象間の奥行、すなわち環境内の3次元的な属性そのものは網膜像中に存在しないからである。

2次元的な網膜像情報から3次元的構造を求めるといことは、幾何学的には一義的に解決できない

「不良設定問題 (ill posed problem)」であると言われている¹⁾。特定の被観察対象(たとえばFig. 1の平面 $A_0B_0C_0D_0$)の2次元的網膜像は、像中の各点から発して対象中の当該の点を通る視線上に存在するあらゆる3次元空間中の点と対応し得る。したがって、3次元空間中の特定の対象の2次元的画像が網膜上に投影された場合、その画像だけから対象の3次元的な配列を計算することは、幾何学的には不可能なのである。

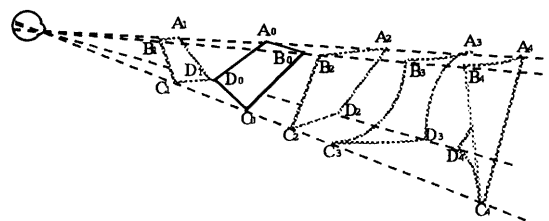


Fig. 1 3次元的配置に対する網膜像の多義性

人間の視覚系はどのようにしてこの「解けない問題」を解き、奥行や距離の知覚を成立させているのか。これは奥行や空間の知覚の研究における根本的な問いである。この問いに答えるべくこれまでにさまざまな議論が行われてきた。たとえば、英国経験論哲学者Berkeleyは、触覚を通して得た空間的概念が経験によって視覚的概念と結び付くことによって、視環境中に存在する徴表 (sign) から空間についての概念が得られるようになることを主張した²⁾。また、生態学的視覚研究の祖Gibson³⁾は、光学的配列そのものの中に存在する空間構造に関する不変情報を視覚系が直接的に得ていると主張した。この考え方は、生体がそれに基づいて外界の構造についての知覚を成立

させることができる不変項(invariance)を規定することの重要性を指摘した点において、現在の奥行知覚研究に大きな影響を及ぼしている。

BerkeleyやGibsonを含めた長い年月にわたる議論に基づき、現在の多くの奥行知覚の研究者は、対象の奥行に関して適切な情報を提示する様々な奥行手がかり (depth cue) から得られる奥行情報の処理に基づいて奥行知覚が成立すると考えている(「奥行知覚の手がかり説」)。たとえば、知覚心理学の一般的な教科書では、多くの距離や奥行の手がかりからの情報抽出に基づいて奥行知覚が成立することが説明されている^{4,5)}。

3. さまざまな奥行手がかり

手がかり説にのっとったこれまでの研究によって、視覚系はさまざまな手がかりからの情報に基づいて奥行知覚を成立させていることが明らかにされてきた。ここで注意しなければならないのは、どの手がかりも奥行の知覚の成立にとって等しく効果的であるというわけではないということである。つまり、手がかりによって、幾何学的に対応する奥行の属性に違いがあり、奥行知覚を成立させたり安定させる際の有効性に違いがある。

たとえば、幾何学的議論によって明らかにされてきたことであるが、視覚系が観察距離についての情報を持つとき、観察者の視点移動によって生じる運動視差と両眼視差の手がかりとは、対象の奥行の方向 (order, 2つの対象のうちどちらが観察者により近い) と量 (magnitude, 対象間の奥行軸上の距離がどれだけである) の属性と一義的に対応する。他方、遮蔽、相対的な明るさの手がかりは奥行の方向にのみ対応する。線遠近法、大気遠近法の手がかりは奥行の方向と奥行量の比にのみ対応し、対象の回転によって生じる運動性奥行手がかり (kinetic depth cue) と陰影の手がかりは観察対象間の奥行量の比にのみ対応する⁶⁾。

実験的研究においても、運動視差⁷⁾と両眼視差⁸⁾の奥行手がかりがそれぞれ単独で提示された場合でも安定した奥行の方向と奥行量の知覚を成立させるのに有効であることが明らかにされている。他方、他の手がかりからはこれほどまでに安定した奥行方向と奥行量の知覚は成立しにくい。たとえば、対象の回転に基づく運動性奥行⁹⁾や陰影¹⁰⁾の手がかりが主な情報源である画像の観察では見かけの奥行方向がしばしば逆転するし、遮蔽、相対的な明るさや線遠近法の手がかりの提示によって観察者が一貫した奥行量を知覚するのは困難である。

4. 奥行知覚研究の端緒

従来の多くの実験心理学的研究においては、個々の手がかり単独の処理過程が検討されてきた。本論の主題である、複数の情報源からの奥行知覚についての体系的研究はあまり行われてこなかったのである。これは、知覚の様相や刺激の属性ごとにチャンネル的処理過程が存在し、それらは相互に独立であるという知覚のモジュール仮説¹¹⁾が長い間にわたり視覚研究において支配的であったためと考えられる。実際、運動視差⁷⁾や両眼視差⁸⁾の手がかりのみが特定の奥行を示すランダムドット刺激の観察でも安定した奥行知覚が成立するという発見は、手がかり別の処理を行うモジュールによって奥行知覚が構成されているという仮説を支持するものと考えられていた。

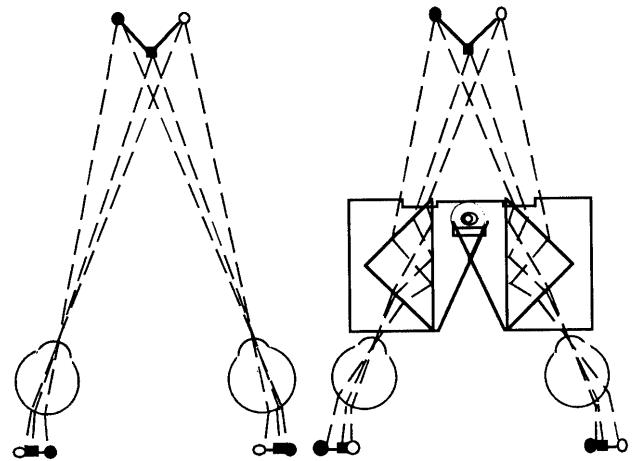


Fig. 2 シュードスコープによる両眼視差方向反転

しかしながら、複数の手がかりからの奥行知覚過程の検討そのものの歴史は古い。現在、複数の情報源からの奥行知覚過程を検討する場合、特定の手がかりと他の諸手がかりとの間に不一致がある状況を作りだし、観察によって生じた奥行の見えから知覚系の処理過程を検討するというパラダイムが用いられる。実は、このパラダイムに基づく観察研究は、奥行手がかりとしての両眼視差を発見したWheatston¹²⁾によってすでに今から150年近く前に実施されていた。Wheatstoneは直角プリズム2つを使って両眼視差と両眼輻輳の方向を反転させるシュードスコープ(pseudoscope)なる光学装置を創作した。Fig. 2が示すように、これを通して観察すると(右側)左右眼の網膜像のずれ方(■が示す対象凸部の網膜像が右寄りか左寄りか)が裸眼時(左側)と反対になる。それゆえ、シュードスコープを通して両眼観察すると、両眼視差および両眼輻輳とその他の手がかり

りとの間に、裸眼時には存在しなかった不一致が生じる。Wheatstonは、このように光学的変換を用いて自然な環境のもとでは存在しない事態を作り出すというパラダイムを適用することによって、特定の奥行手がかりを個別に分析できるだけでなく、視環境中に存在している様々な要因に奥行知覚がどのような仕方で依拠しているのかを知ることができると指摘した。

両眼視差手がかりおよび両眼立体視の発見者であるWheatstone自身が、両眼視差や両眼輻輳と他の手がかりとを矛盾させることによって奥行知覚の理解を得ることができると考えていたことは、現在の奥行知覚研究の動向を考える上でも大きな意味を持つ。奥行知覚研究の端緒において、個別の手がかりの処理過程とそれらをまとめる統合過程とを検討することによって奥行知覚を理解できるという、本論の主題である問題意識がすでに動機づけられていたことになるからである。

5. 手がかり間に不一致がある場合の奥行観察

手がかり間に奥行情報の不一致がある場合、どのような奥行知覚が生じるのか。

Wheatstone¹²⁾は、上述のシュードスコープを通した観察で茶碗やメダル、胸像、庭の植木の枝について実際とは反対の奥行方向が見えることを報告している。また、シュードスコープを通した観察の間、実際とは反対の奥行の見えはときどきしか生じなかったことから、両眼視差や両眼輻輳よりも陰影や遠近法のような単眼的要因のほうが知覚を決定する上で優勢であると推測した。シュードスコープと同様の仕方で両眼視差と輻輳の方向を光学的に反転させる逆転眼鏡や左右反転眼鏡を通した日常的観察においても実際とは反対の奥行が知覚されることが数多く報告されている¹³⁻¹⁷⁾。また、これらの反転眼鏡研究では、眼鏡の装着中、実際よりも小さな奥行が見えることが報告されている^{13, 15)}。さらに、このような光学的変換を長期にわたって継続させた観察研究では、実際とは反対の奥行の見えについて、変換開始から3日ほどしたところに生起頻度が減少したり¹⁴⁾、反転眼鏡の装着期間が十数日を超えるとほとんど報告されなくなる¹⁶⁾ ことが見い出されている。

シュードスコープや反転眼鏡を通して観察した場合のように手がかり間に情報の不一致があるとき、視覚系はどのような処理を行っているのだろうか？ 続く6節と7節において、実験的研究がこれまで明らかにしてきたことを整理する。

6. 複数の手がかりからの奥行情報統合過程についての実験的研究

それぞれ異なる奥行情報を示す複数の手がかりからの奥行知覚過程についての実験的研究の数は1980年代以降になって増えてきた。こうした研究動向は、この時期になって個別の手がかりからの情報の処理過程についてのたまかな理解がなされるようになったこと、コンピューターをつかったシミュレーション刺激によって複数の手がかりを同時に提示することが簡単になったこと、また、やはり、個別の手がかりからの情報処理過程だけ理解できても、多様な情報源に基づいて成立している日常的な奥行知覚を理解できないという問題が明瞭になってきたことによるのであろう。

上述したように、Wheatstonや反転眼鏡を使った観察研究は、両眼視差の示す奥行方向を他の手がかりの示すそれと不一致にさせた場合、見かけの奥行方向は両眼視差や輻輳によって決定されたり、その他の手がかりによって決定されたりすることを見い出してきた。実験的研究においても、それぞれ反対の奥行方向を示す2つの手がかりを組み合わせると提示した場合、どちらか一方の手がかりによって見かけの奥行方向が決定されることが明らかにされてきた。ただし、手がかりの種類によって、見かけの奥行方向が決定される仕方が異なる。たとえば、両眼視差と運動視差とがそれぞれ反対の奥行方向を示した場合、観察の度に二者択一的にどちらかの手がかりにしたがった奥行方向が知覚される^{18, 19)}。見かけの奥行方向は両眼視差によって決定されることが多いが、両眼視差が見かけの奥行方向を決定する頻度は、両眼視差の示す奥行量が大きくなるにつれて増加し、被験者の運動視差観察の経験が多くなるにつれて減少する¹⁸⁾。それに対し、運動視差と遮蔽²⁰⁾、両眼視差と空間周波数差²¹⁾の手がかりを組み合わせた場合には、一方の手がかりが示す奥行量と他方の手がかりが示す奥行量の情報の引き算のような処理が行われる。つまり、これらの手がかりがそれぞれ反対の奥行方向を示した場合、より大きな奥行を示した手がかりによって見かけの奥行方向が決定される。

他方、各手がかりが異なる奥行の大きさを示す事態を用いることによって、奥行量情報の統合過程が調べられている。いろいろな手がかりを組み合わせると提示した実験研究では、各手がかりの示す奥行量の中間の大きさの奥行量が知覚されることが明らかにされてきている。すなわち、2つの手がかり、たとえば、運動視差と両眼視差^{16, 18)}、運動視差と動的な遮蔽²⁰⁾、両眼視差と空間周波数差²¹⁾、両眼視差と単眼

的輪郭^{22,23}、両眼視差と陰影²⁴、キメ勾配と陰影²⁵、運動性奥行と明るさ²⁶がそれぞれ異なる奥行量を示した場合、2つの手がかりの示す奥行量の中間の大きさの奥行量が知覚される。このような「平均化」的な処理は、情報源となる手がかりの種類に依存しない、奥行量情報統合における一般的な方式であると考えられる。

複数の手がかりが間接的な仕方で相互に補い合っていることも実験的研究によって指摘されている。運動性奥行²⁷やパースペクティブと両眼輻輳²⁸の手がかりが距離知覚への寄与を介して、両眼視差からの奥行知覚に影響を及ぼしている。上述したように、視覚系に与える情報の内容は手がかりによって異なる。それゆえ、個々の手がかりからの情報がその得意な情報内容によって相互に補い合う形で寄与するという視覚系の処理様式はリーズナブルなものと言える。

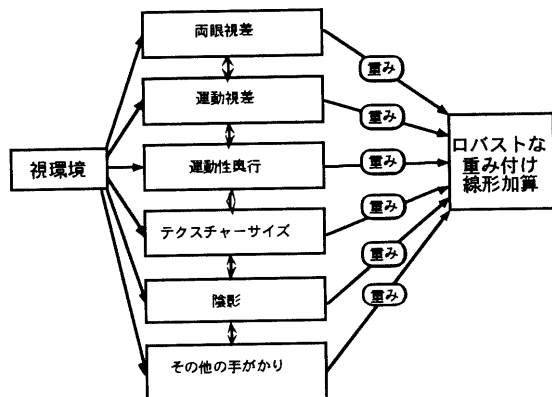


Fig. 3 重み付け線形加算モデル (Weak fusion model) の概要

以上に紹介した研究結果に基づき、各手がかりの信頼度に従った重みづけ加算を仮定する心理物理学的モデルが提起されている²⁹。このモデル (Fig. 3) では、視覚系は平均化 (重みづけ線形加算) することによって複数の手がかりからの情報を統合すると考えられている。各手がかりの処理過程は、情報が一致したときに促進し合うこと (Fig. 3中の各手がかり処理過程間の垂直方向の矢印)、特定の手がかりの信頼度が低い場合、その手がかりからの情報に付される重みが小さくなることによってその情報は無視され、奥行知覚に寄与しないことが仮定されている。この他と矛盾する手がかりに対するロバストネスは、上述の二者択一的な選択の説明を説明するためのものである。このようなロバストネスは反転眼鏡やシュードスコープ装着中の日常的な観察の説明

においても有用である。両眼視差以外の手がかりが存在する場合、あまり奥行の逆転が見られない^{16, 17}し、反転眼鏡装着中、両眼視差通りの (通常とは逆転した) 奥行方向が常に知覚されているわけではない^{12, 15, 17}。上のモデルに従えば、これらの観察は、他の手がかりからの情報との不一致が極端に大きかったために、視覚系が両眼視差からの情報を無視したことによって生じたと説明できる。

しかしながら、このように各手がかりの処理の間の相互独立性を仮定するモデル (Weak fusion model と呼ばれる³⁰) にはいくつかの問題がある。特に深刻な問題は、次節に紹介する奥行知覚の順応過程を考慮していないことである。

7. 奥行知覚過程の順応的变化についての実験的研究

本論文5節で、反転眼鏡を通した日常観察での実際とは反対の奥行の見えの生起頻度が反転眼鏡装着期間の経過にしたがって減少するという報告を紹介した^{14, 15}。この報告は、両眼視差方向を反転させる光学的変換事態に順応するように視覚系が変化したことを示唆している。実験的研究においても、手がかり間に矛盾が長時間にわたって持続する場合、知覚過程に順応的変容が生じることが明らかにされている。

たとえば、両眼視差が他の手がかりよりも大きな (小さな) 奥行量の情報を示すような光学的変換を10分間程度持続させた場合、両眼視差のみから知覚される奥行量は減少 (増大) する³¹。これは、両眼視差から奥行知覚を成立させる過程が、他の手がかりの示す奥行量に近づくように順応的に変化したことを示唆する。すなわち、光学的変換によって生じた状況に適応するために、両眼視差の大きさで見えの奥行量との対応関係の合わせ直し (recalibration) が生じたのだと考えられる。なお、その後の奥行量の光学的変換実験においては、順応の程度は光学的変換の期間が長くなるにつれて増大するものの、数時間程度の順応期間の間には完全な順応的变化は生じないこと、順応が生じた後に裸眼 (通常の状態) で観察したり閉眼することによって順応効果が急速に失われること³²、順応期間が長いと却って順応効果が減少する傾向にあること³³が見い出されている。

両眼視差と輻輳とを逆転させる光学的変換に対しての両眼立体視の順応的变化はより長い時間を要する。たとえば、左右反転眼鏡を9日間連続装着した1名の観察者について、装着開始から3日目の線画ステレオグラム観察で両眼視差が示す奥行方向とは

反対の奥行方向の知覚が生じたこと、それ以降の眼鏡装着中および眼鏡除去後の数日間にわたって両眼視差が示すのとは反対の奥行方向が知覚され続けたことが報告されている³⁴⁾。また、この被験者においては、ランダムドットステレオグラム観察では変化は認められなかった。その後の別の研究では^{13, 35)}、左右反転眼鏡を10~11日間連続装着した複数の被験者について、線画ステレオグラムとランダムドットステレオグラム観察で両眼視差が示すのとは反対の奥行方向が知覚されるという変化が生じたこと、ただし、この変化が生じるステレオグラムのタイプに被験者による違いがあることが見いだされた。これらの研究では、異なる距離にある指標を注視する際の両眼輻輳方向が反転眼鏡装着中に逆転したこと³⁴⁾、眼球運動の制限がステレオグラム観察での両眼視差が示すのとは反対の奥行方向知覚の生起頻度を減少させたこと³⁵⁾から、両眼視差方向反転の状況への順応的变化において、眼球運動をコントロールする過程が何らかの役割を果たしている可能性が指摘されている。

また、両眼視差の方向を逆転させる光学的変換に対する順応の生起は、両眼視差の処理過程に留まらないことを示す結果が得られている。ステレオグラム観察ではいったん得られた両眼立体視の変化が反転眼鏡装着期間中に消失することがある。ところが、そのような被験者でも、反転眼鏡を通して両眼視差、重なり、遠近法、刺激の大きさ等の多様な手がかりが存在する刺激を観察した場合、実際の奥行に対応する奥行方向の知覚の生起頻度は反転眼鏡装着期間全体を通じて増加し続けたのである³⁵⁾。この結果は、多様な手がかりが存在する状況における奥行知覚の順応的变化は両眼視差処理過程の変化だけに帰することはできないことを意味する。つまり、両眼視差方向を反転させる光学的変換に対して視覚系は、両眼視差の処理の仕方ばかりではなく、両眼視差からの情報とその他の手がかりからの情報の利用・統合の仕方をも順応的に変えるのである。

6節で紹介された奥行知覚モデル (Fig. 3) はこうした順応過程を扱うことができない。なぜなら、このモデルでは各手がかりの処理モジュールの間には促進的な相互作用しか仮定されておらず、それらの間の相互調整の過程が想定されていないからである。

8. 今後の奥行知覚研究の展望

ここまで概観してきたように、異なる源からの奥行情報の統合過程の研究と奥行知覚の順応過程の研究とはそれぞれ比較的独立に展開してきた。これら

2通りの研究の間では研究者のオーバーラップもほとんどない。それゆえ、奥行情報の統合過程研究で提案された奥行知覚モデルにおいては、順応研究が扱ってきた知覚過程の変化のダイナミクスは取り上げられていない。また、順応研究においても、順応進行中に視覚系がどのように多様な源からの情報を統合して奥行知覚を成立させているのかは不問に付されている。しかしながら、奥行知覚の可塑性を考慮した場合、各時点において生じる奥行の知覚は普段の視環境への順応 (知覚学習) の結果に他ならず、順応過程の仕組みを取り扱わなければ奥行情報統合過程の理解に限界がある。また、順応進行中の奥行知覚系の処理過程を理解しなければ順応過程の詳細を理解することは不可能である。それゆえ、奥行知覚過程および視覚情報処理過程の理解のために、いまや上記の2つの流れの奥行知覚研究をまとめるモデルが必要であると考えられる。

手がかり別の情報処理過程についての従来の研究や、上述した奥行情報の統合過程のモデル (Fig. 3) では、個々の手がかりの処理の相互独立性 (モジュール性) が仮定されている。しかしながら、本論の8節で見えてきたように、奥行手がかり間の情報の不一致によって両眼視差から奥行知覚を成立させる過程、および複数の手がかりからの奥行情報を統合する過程が変化することが見いだされてきた。このことは、個別の手がかり (たとえば両眼視差) の処理が他の手がかりの処理とは独立ではなく、相互に影響を及ぼしあっていることを意味している。また、最近、両眼視差と運動視差の手がかりを同時提示した実験研究においても、これら2つの手がかりの処理に共有の過程があること、それらの処理が相互独立ではないことが示唆されてきている³⁴⁻³⁹⁾。ここにきて奥行知覚研究における個々の手がかりの分節 (モジュール性) が疑わしくなりつつあると言える。それゆえ、知覚過程を総合的にとらえる実験研究の必要性が今後ますます大きくなる。

奥行知覚における情報統合と順応の過程とを扱うモデルとして基本的などのような特質が要求されるかを新たなモデルにおいて整理しておこう (Fig. 4)。各手がかりの処理過程は、その手がかりと他の手がかりとの一致・不一致をチェックしつつ処理を行う過程 (Fig. 4のグレイ部分) を共有する。各手がかりの処理過程は固定したものではなく、他の処理過程との間で処理結果の整合性を保つため、相互に密接に関連し調整しあう (Fig. 4のグレイ部分と各処理過程とを結ぶ矢印)。ただし、これまで実験的研究が右下がりの矢印の表現する過程の存在を認めているのは、両眼視差の処理過程のみである³⁹⁾。また、

各手がかりからの情報は、(Fig. 4のグレイの矢印が示すように) 他の手がかりとの一致度にしたがって変更される重みを与えられた上で統合され、奥行の見えを決定する。この際、他の手がかりと一致しない情報を示す手がかりへの重みは減少され、逆に、特定の手がかり間で情報が一致するときにはそれらに与えられる重みはともに増加される。

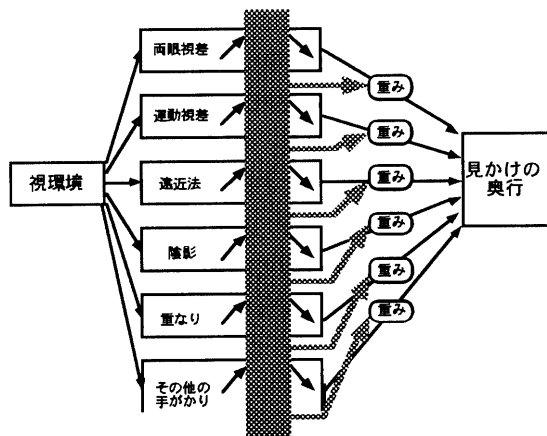


Fig. 4 新しい奥行知覚過程のモデル (Strong fusion model)

このモデルのように各手がかりの処理の間の強い相互干渉を仮定するモデルは、(Weak fusion model に対して) Strong fusion model と呼ばれる³⁰⁾。Fig. 4 に示したような Strong fusion モデルを用いれば、見かけの奥行量や奥行方向から算出される重みの値の分析によって奥行情報統合の過程と順応過程の両方を具体的に検討することが可能となる。

9. 結語

今後、Fig. 4 に示したようなモデルを用いて、手がかりの種類や手がかり間の不一致の程度によって統合過程にどのような違いがあるのか、奥行知覚の成立に関わる諸々の要因(たとえば、観察者の運動や各手がかりの提示の仕方等の要因)にしたがって各手がかりの有効性がどう(順応的に)変化していくのか、両眼視差以外の手がかりの処理の仕方も他の手がかりの情報との一致・不一致によって変化し得るのか等の問題をシステムティックに探究していくことが必要である。

工学的応用の観点からすると、このようなモデルを用いて人間の奥行知覚過程を検討することによって、ロボットビジョンや立体画像提示技術の開発を進める上で有効な基礎データを提供することになる

う。奥行知覚モデルの構築は特に立体画像提示技術開発にとって特に重要である。従来の立体画像提示システムでは両眼視差手がかりを主な情報源とされているために両眼視差とその他の手がかりとの間に情報の不一致が存在する。それゆえ、観察者はしばしば不自然な奥行の印象を受けたり、極度に疲労したりする。また、視覚系の基本的な処理過程が安定していない低年齢の観察者においては、両眼筋の極度の緊張のために斜視が生じる可能性が指摘されている⁴⁰⁾。安全で快適な立体画像提示技術の開発のためにも、奥行情報の不一致の程度と適切な知覚処理の限界との関係を明らかにしておく必要がある。

参考文献

- 1) Poggio, T., Torre, V. and Koch, C.: Parallel integration of vision modules. *Science*, Vol. 317, pp.314-319, 1985.
- 2) Berkeley, G.: An essay towards a new theory of vision. In A. C. Fraser (ed.): *The works of George Berkeley*, D. D. formerly Bishop of Cloyne, (pp. 25-114), Clarendon Press, Oxford, 1709.
- 3) Gibson, J. J.: *The ecological approach to visual perception*. Houghton-Mifflin, Boston, 1979.
- 4) Bruce V. and Green, P.: *Visual perception: physiology, psychology and ecology*, Erlbaum Association, Lawrence, 1990.
- 5) Rock, I. *An introduction to perception*. Macmillan, New York, 1975.
- 6) Maloney, L. T. and Landy, M. S.: A statistical framework for robust fusion of depth information. In W. A. Pearlman (Ed.) *Visual communication and image processing IV. Proceedings of the SPIE*, No. 1199, pp.1154-1163, 1989.
- 7) Rogers, B. J. and Graham, M. E.: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, Vol. 8, pp.125-134, 1979.
- 8) Julesz, B.: *Foundation of cyclopean perception*. University of Chicago Press, Chicago, 1971.
- 9) Wallach, H. and Karsh, E. B.: The modification of stereoscopic depth-perception and the kinetic depth-effect. *American Journal of Psychology*, Vol. 76, pp.429-435, 1963.
- 10) Goldstein, E. B. *Sensation and perception*, 3ed. Wadsworth Pub, Belmont, 1989.
- 11) Fodor, J.A.: *The modularity of mind: an essay on faculty psychology*. MIT Press, Cambridge, 1983.
- 12) Wheatston, C.: Contributions to the physiology of vision - Part the second. On some remarkable, and hitherto unresolved, phenomena of binocular vision. *Royal Society of London, Philosophical Transactions*, Vol. 142, pp.1-17, 1852.
- 13) 御領・江草: 逆転視野への適応過程—被験者の体験報告の分析を中心として—。人文研究(千葉大学文学部紀要), Vol.21, pp.1-78, 1992.
- 14) Peterson, J. and Peterson, J. K.: Does practice with inverting lenses make vision normal? *Psychological monograph*, Vol. 50, pp.12-37, 1938.
- 15) 積山: 左右反転眼鏡の世界。ユニオンプレス, 大阪, 1987.

- 16) 太城：逆転視野眼鏡着用実験 予備的試み(2). 人文研究(大阪市立大学文学部紀要), Vol.40, pp.35-65, 1988.
- 17) 吉村：左右反転視実験(13日間)における記述的データ集：被験者の言語報告と行動観察記録. 金沢大学文学部論集行動科学篇. Vol.5, pp.1-33, 1985.
- 18) Ichikawa, M. and Saida, S.: How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception? *Perception & Psychophysics*, Vol. 58, pp.271-282, 1996.
- 19) Rogers, B.J. and Collett, T. S.: The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 41, pp.697-717, 1989.
- 20) Ono, H., Rogers, B. J., Ohmi, M. and Ono, M. E.: Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, Vol. 17, pp.255-266, 1988.
- 21) Brown, J. M. and Weiststein, N.: A spatial frequency effect on perceived depth. *Perception & Psychophysics*, Vol.44, pp.157-166, 1988.
- 22) Stevens, K. A. and Brookes, A.: Integrating stereopsis with monocular interpretations of planar surfaces. *Vision Research*, Vol.28, pp.371-386, 1988.
- 23) Stevens, K. A., Lees, M. and Brookes, A.: Combining binocular and monocular curvature features. *Perception*, Vol. 20, pp.425-440, 1991.
- 24) Bülhoff, H. H. and Mallot, H. A.: Interaction of depth modules: stereo and shading. *Journal of Optical Society of America*, Vol.5, pp.1749-1757, 1988.
- 25) Curran, W. and Johnston, A.: Integration of shading and texture cues: testing the linear model. *Vision Research*, Vol.34, pp.1863-1874, 1994.
- 26) Doshier, B., Sperling, G. and Wurst, S. A.: Tradeoffs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure. *Vision Research*, Vol.26, pp.973-990, 1986.
- 27) Johnstone, E. B., Cumming, B. G. and Landy, M. S.: Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, Vol.34, pp.2259-2275, 1994.
- 28) Bradshaw, M. F., Glennerster, A. and Rogers, B. J.: The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues. *Vision Research*, Vol.36, pp.1255-1264, 1996.
- 29) Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B. and Young, M.: Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion. *Vision Research*, Vol.35, pp.389-412, 1995.
- 30) Clark, J. J., and Yuille, A. L.: *Data fusion for sensory information processing system*. Kluwer, Boston, 1990.
- 31) Wallach, H., Moore, M. E. and Davidson, L.: Modification of stereoscopic depth perception and the kinetic depth. *American Journal of Psychology*, Vol.76, pp.429-435, 1963.
- 32) Epstein, W.: Recalibration by pairing: a process of perceptual learning. *Perception*, Vol.4, pp.59-72, 1975.
- 33) Lee, D. Y. and Chiuffreda, K. J.: Short-term adaptation to the induced effect. *Ophthalmology and Physiological Optics*, Vol.3, pp.129-135, 1983.
- 34) Shimojo, S., and Nakajima, Y.: Adaptation to the reversal of binocular depth cues: effects of wearing left-right reversing spectacles on stereoscopic depth perception. *Perception*, Vol.10, pp.391-402, 1981.
- 35) Ichikawa, M., and Egusa, H.: How is depth perception affected by long term wearing of left-right reversing spectacles? *Perception*. Vol.22, pp.971-984, 1993.
- 36) Bradshaw, M. F. and Rogers, B. J.: The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth. *Vision Research*, Vol.36, pp.3457-3468, 1996.
- 37) Cornilleau-Pérès, V. and Droulez, J.: Stereomotion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure. *Perception & Psychophysics*, Vol.54, pp.223-239, 1993.
- 38) Ichikawa, M. and Saida, S.: Interaction of binocular and motion disparity depth cues at near threshold level. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol.36, pp.667, 1995.
- 39) Nawrot, M. and Blake, R.: The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception & Psychophysics*. Vol.49, pp.230-244, 1991.
- 40) 筑田・村井：立体映画を見て顕性になった内斜視の一症例，日本視能訓練士協会紙別冊，Vol.16, pp.69-72, 1988.

(1997. 10. 15 受理)

DEPTH PERCEPTION FROM MULTIPLE CUES

Makoto ICHIKAWA

In order to understand the human depth perception, vision researchers have investigated the process which integrates the depth information from multiple depth cues. In these studies, however, they did not consider the perceptual learning process that underlies the adaptation towards the situation in which there are conflicts among depth cues. I propose a new model for future studies which can take account of both cue integration process and adaptation process.