

## 視覚における情報統合：奥行き情報の統合過程

塩入 諭

千葉大学 工学部

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

### 1. はじめに

視覚の重要な役割のひとつは、3次元の世界を把握することである。この3次元の知覚は、網膜像が2次元であるため、間接的な手続きや様々な推定を含むことになる。視覚系はおそらくその推定の精度をあげるために、奥行き知覚にかかわる数多くの情報源、手掛かり(cue)を利用している。多くの手掛りの利用は、一方で、異なる奥行き情報を統合する必要を生じることにもなる。本稿では、複数の奥行き手掛りの統合過程としてどのようなものが考えられるかについてまとめてみたい。なお、ここで引用する文献は主に概説に必要なものに限っている。網羅的な論文の検索のためには他の文献<sup>1)4)</sup>を参照していただきたい。

奥行きの手掛りには、両眼網膜像差に基づく両眼立体視、運動情報に基づく運動視差(motion parallax)や動きからの立体知覚(運動立体視, structure from motion, kinetic depth effect)、重なり、陰影、遠近法などの絵画的な手掛かり(pictorial depth cue)、さらに輻輳角、調節などがある。そして複数の手掛りが存在するときには、より精度の高い推定が可能となることは、多くの研究が示すところである。しかし、精度の向上に関連する現象は、ある特定の奥行き統合過程の処理結果とは考えにくく、いくつかの分類が可能である。ここでは重み付き平均、促進効果あるいは助長効果(promotion)、共通処理、フィードバック処理、補完処理、再説明にわけて、

異なる奥行き情報の統合過程のあり方について考察する。

各現象について述べる前に、すべての奥行き情報が必ずしも、ひとつの奥行き表現として統合されていない可能性について指摘しておく。例えば、陰影からの奥行きとテクスチャーからの奥行きとを比較すると前者が面の曲率知覚に有効であるのに対して、後者は空間内での物体の方向(楕円体の軸の方向など)の抽出に有効であることが示されている<sup>5)</sup>。このことは、奥行きを考えるうえではすべての手掛りが単一の3次元形状や位置を求めるために利用されているわけではなく、奥行き/立体情報をいくつかの側面にわけて処理していることを示唆する。この場合、奥行き統合の過程の最終段階として複数の過程を考える必要があることになる。図1は、ここで考える現象を考慮にいれた奥行き統合過程の模式図である。最終段階における複数の奥行き過程は、図中の奥行き統合1, 2, 3で示されている。なお、この模式図は、以下で述べる各現象やモデルすべてを表現することを目的としている。

### 2. 重み付き平均

2つの奥行き手掛りを制御した実験から、それぞれの手掛りの与える奥行き量の重み付き平均によって知覚される奥行き量が予測できることが示されている<sup>6)9)</sup>。例えば、適当なテクスチャー表面を持つ円筒状の刺激を運動させ、テクスチャーと運動の持つ奥行き量を独

立に変化させるとする。ここで、同一の運動条件に対してテクスチャーによる奥行きを大きくしたとき知覚される奥行きは大きくなるが、その大きさは運動の示すものとテクスチャーの示すものを適当な重みで平均したものに近い<sup>6)</sup>。テクスチャーにノイズを加えた場合には、テクスチャーの奥行きの効果が減少することから、手掛かりに対する重みがその信頼性に依存して変化すると考えることができる。図1の模式図では、異なる2つの奥行き処理過程A,Bの結果を次の過程で統合するとき両者の重み付き平均を計算するという形で表される。もちろん、3つ以上の奥行き処理過程がかかわる場合も同様に考えることができる。

### 3. 促進効果

重み付き平均が、それぞれの手掛りから奥行きを独立に処理し、その結果を平均化するという処理を想定するのに対して、促進効果は、ある手掛りの奥行きの処理に他の手掛りを利用する場合などに対するものである<sup>6)</sup>。例えば、両眼立体視による奥行きの判断には絶対距離が必要であるが、その情報は水平の網膜像差から得ることはできない。眼球位置（輻輳角）や対応網膜像の垂直方向のずれ（垂直視差）などを用いた対象までの距離の推定が両眼立体視に影響することが知られて

いる<sup>1)</sup>ことから両眼立体視の処理過程は他の手掛りで得られた絶対距離を使っていることがわかる。同様に、運動立体視では前後関係が不明な条件でも他の手掛りによって規定される前後関係をもとに正しい立体の知覚が可能となる。これは前後関係のあいまいさを除去（disambiguation）しているわけであるが、促進効果の一例と考えられる。図1の模式図においては、促進効果は処理過程A,Bの間の矢印で示される相互作用（MI, mutual interaction）で表すことができる。この矢印は、過程Aで得られた情報（例えば対象までの距離）が、過程Bでの処理に利用されていること（あるいはその逆）を示している。

### 4. 共通処理

ここで、共通処理として分類したのは、ある処理過程が、複数の奥行き手掛りの入力を得ている（例えば単一ニューロンが感度をもっている）場合である。重みづけ平均において、それぞれの手掛りの処理で得られた奥行きを統合する処理過程を考えるのに対して、ここでは複数の手掛りをもとに奥行きを計算するというを想定する。このような処理は、運動視差からの奥行きと両眼網膜像差の奥行きとの相互作用の存在から示唆される。両者の間には、奥行きに対する順応効果

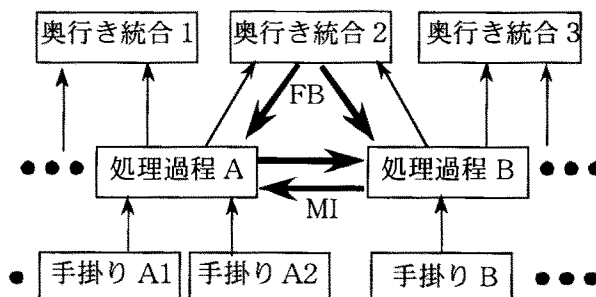


図1 奥行き統合過程の模式図。複数の手掛りに対して、それぞれに対応する処理系がある。ここでは、複数の手掛りが影響するものも考えている。それぞれの処理系の結果が奥行きの統合過程に送られ、重み付き平均処理によって統合される。それぞれの処理過程は完全に独立ではなく、各処理過程相互の間の相互作用（MI）、および統合過程からのフィードバック（FB）によって相互に影響を与える。

の共通性（転移する）、閾下加算、空間周波数特性の類似などがあり<sup>11-13)</sup>、これらは奥行きを検出過程そのものが共通である可能性を示す。模式図上では、処理過程 A に 2 つの手掛り A1 と A2 が入力されることで表現されている。処理過程 A は手掛り A1 と A2 の両方に感度を持ち、それら进行处理してその結果を統合過程に送ることになる。

## 5. フィードバック

ここではフィードバック (feedback) 過程を、単に高次の過程からの影響として考える。統合過程で得られた結果が、それぞれの手掛りの処理に影響を与えるということを想定している。促進効果が、欠如する情報を補うという意味での影響であるのに対して、フィードバック処理は奥行き量や立体情報そのものの影響を意味する。このような過程は、両眼立体視の処理時間への絵画的手掛りの影響の結果から予測される。例えば、輪郭形状あるいは陰影が整合的である場合と不整合的である場合に両眼立体視の形成時間を比較すると、後者では前者の 2 倍程度になる<sup>14, 15)</sup>。この結果は、先に処理された絵画的手掛りが両眼立体視の形成に影響を与えているものと考えerことで説明できる。絵画的手掛りの両眼立体視への影響は、反応時間のみならず検出閾値にも影響する可能性についても実験的に支持されている<sup>16)</sup>。整合的な絵画的手掛りにより両眼視差の検出閾値が低下するが、これも絵画的手掛りによって得られた奥行がフィードバックによって両眼視差の検出過程に影響を与えると考えることで説明できる。これらのフィードバックは、図 1 では統合過程からそれぞれの処理過程へ向かう矢印 (FB, feedback) で表される。ここでは、フィードバックは促進効果とは異なり、統合過程での処理結果がそれぞれの処理に影響すると考えている。ただし、このような現象は促進効果の場合と同様に、別の過程から直接影響を受けるというモデルでも説明は可能で

ある。ここでは複数の手掛りからの同様の処理を説明するために統合過程からのフィードバックとしている。実際に相互作用とフィードバックを区別するためには、詳細な検討が必要となる。

## 6. 補完的処理

複数の奥行き手掛りの利用は、特定条件での精度の向上という側面のほかに、広範囲の条件にわたって奥行きの知覚が可能にするという点でも意味がある。よく知られるように、両眼立体視が効果的に働く範囲は比較的近距离であるのに対して、大気遠近法などは非常に遠くの対象を見るときに効果的に働く<sup>17)</sup>。多くの手掛りを利用することは、広範囲の状況に対応できることを意味する。この点は、手掛り存在自体の物理的な問題でもあるが、視覚系が手掛りにそれらを利用してるとすれば、それぞれの手掛りの処理系は補完的な働きをすることになる。

例えば、2 つある両眼性の奥行き運動手掛り処理の感度特性を比較すると、異なる特性を示す。2 つの手掛りとは、両眼視差の時間変化と両眼間速度差であり、いずれも視覚系によって利用されていると考えられる<sup>18-21)</sup>。これらの 2 つの手掛りを分離した刺激において、刺激の速度が変化すると、両眼視差の時間変化条件では遅い刺激に、両眼間速度差条件では速い刺激に感度が高い傾向がある<sup>19)</sup>。奥行運動検出に係わる 2 つの処理過程は異なる速度に最大感度を示し、補完的な役割を果たしていることが予想される。

手掛りの補完的な役割については、重み付き平均処理の重みが条件によって大きく変化すると考えることによって説明できる。上の奥行き運動の例では、速い運動に対しては両眼間速度差の処理過程の重みが大きく、遅い速度では両眼視差の処理過程の重みが大きくなると考えればよく、さらに極端な場合には一方の重みをゼロにすればよい。

## 7. 再説明

手掛りが2つあり、互いに大きく異なる奥行きを示す場合には、一方の手掛りのみによって知覚される奥行きが決定されることが多い。この場合、他の手掛りは奥行の評価に考慮されないことになる<sup>2),14),15)</sup>。例えば、ランダムドットステレオグラム<sup>14)</sup>の与える両眼立体視の情報<sup>15)</sup>がその刺激の輪郭形状の持つ奥行と全く矛盾する不整合条件（刺激は長方形の面が奥行方向に正弦波状に波打つ刺激で、2つの手掛りの正弦波の位相を変化する）では、多くの場合両眼立体視によって知覚される奥行きが決定される。ただし、刺激の呈示の直後には、輪郭線形状の与える奥行きが知覚される傾向が強く、その後両眼立体視が形成されると、輪郭線の奥行情報は抑制される<sup>15)</sup>。輪郭線の形状は奥行としてではなく、まさにその面のエッジの形状として知覚される（正弦波状のエッジを持つ面が奥行方向に波打っているように見える）。これは再理解あるいは説明の仕直しと呼ばれるべき現象の例である。このように、ある手掛りが優位となるとそれと矛盾する別の奥行手掛りが奥行情報としては抑制され、別の整合的な知覚に変化する事も多い<sup>13)</sup>。

ある手掛りが優位になった場合に必ず説明の仕直しが生じるわけではない。よく知られるお面を裏から見た場合の奥行き反転現象は、実際には凹んだ面であるものが、おそらく顔という非常に親近性の高い対象であるために、通常の顔と同様の凸の面に知覚されるものである。ここでは、両眼網膜像差の情報は無視されることになる。同様に奥行が反転した状況で観察者が頭を動かすと、顔の向きが変化してみえる。つまり、観察者の動きに伴う網膜像の変化が対象の奥行きとしてではなく対象の動きとして知覚されるわけである。この場合、運動視差の奥行情報が抑制され、網膜像の運動が運動として知覚されるわけであるから、これも再説明の例といえる。

再説明という現象は、統合過程で矛盾する

奥行きがあった場合に、一方の重みをゼロにするという処理に対応する。重みがゼロになった処理系では、フィードバックされる奥行き情報とその処理系の出力とが矛盾することになる。再説明は、その矛盾の解消するための処理と捕えることもできる。

## 8. まとめ

以上、奥行き情報の統合過程、相互作用として考えられるものをまとめ、模式図で表現した。しかし、それぞれの処理過程について多くが理解されているわけではない。重み付き平均モデルは定量的な評価も可能であるが、不明な点も多い。例えば、重みの決め方である。信頼性に基づくとしても、信頼性の評価については簡単には答えにくい。また、お面の例などに対しては、信頼性という基準よりも知識に依存した要因を考えることも必要であろう。共通処理は、視差と運動に感度を持つ視覚野のニューロンによって説明できる可能性はある<sup>22)</sup>が、運動の検出と両眼視差の検出がすべて同一とは考えにくい。他の処理については単純化された概念にすぎず、実際にどのような処理を考えるべきかは不明である。多くの検討課題が残されていることは明らかであるが、本稿の目的は、情報統合のあり方の分類にある。今後の奥行き情報（に限らず感覚・知覚過程での情報）の統合や相互作用の研究において、取り扱う問題の種類を明確化するための参考になれば幸いである。

## 文 献

- 1) I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular vision and stereopsis. Oxford University Press, 427-460, 1995.
- 2) 塩入 論：立体／奥行の知覚. *VISION*, 5, 69-76, 1993.
- 3) 塩入 論：奥行き手がかりの統合. 日本視覚学会(編)：視覚情報処理ハンドブック. 朝倉書店, 327-333, 2000.
- 4) 林部敬吉：心理物理学における3次元視研究. 酒井書店, 1995.

- 5) H. H. Bülthoff: Shape from X: Psychophysics and computation. *M. S. Landy and J. A. Movshon (Eds.): Computational models of visual processing*. MIT Press, Cambridge, 305-330, 1991.
- 6) M. S. Landy, L. T. Maloney and M. J. Young: Psychophysical estimation of the human depth combination rule. *P. S. Schenker (Ed.): Proceedings of SPIE 1383 Sensor Fusion III* 247-254, 1990.
- 7) L. T. Maloney, M. S. Landy, A statistical framework for robust fusion of depth information. *W. A. Pearlman (Ed.): Proceedings of SPIE 1199 Visual communication and Image Processing IV*, 247-254, 1989.
- 8) E. B. Johnston, B. G. Cumming and M. S. Landy: Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, **34**, 2259-2275, 1994.
- 9) B. A. Doshier, G. Sperling and S. A. Wurst: Trade offs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure. *Vision Research*, **26**, 973-990, 1986.
- 10) M. Ichikawa: How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception? *Perception and Psychophysics*, **58**, 271-282, 1996.
- 11) B. J. Rogers and M. E. Graham: Aftereffects from motion parallax and stereoscopic depth. *L. Spillmann and B. R. Wooten (Eds.): Sensory experience, adaptation and perception*. Lawrence Erlbaum, New York, 603-619, 1984.
- 12) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers. The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth. *Vision Research*, **36**, 3457-3468, 1996.
- 13) M. Ichikawa and S. Saida: Integration of motion and binocular disparity depth cues at near depth threshold level. *Japanese Journal of Psychonomic Science* **17**, 1-11, 1998.
- 14) 塩入 諭, 佐藤隆夫: 陰影情報の両眼立体視形成への影響. *光学*, **22**, 33-41, 1992.
- 15) 塩入 諭, 佐藤隆夫: 輪郭線形状の両眼立体視形成への影響. *テレビジョン学会誌*, **47**, 364-370, 1993.
- 16) 塩入 諭, 松尾久美, 水野 力, 矢口博久: 奥行整合性の遮蔽知覚への影響. *画像電子学会誌*, **24**, 493-499, 1995.
- 17) 長田昌次郎: 視覚の奥行き距離情報とその奥行感度. *テレビジョン学会誌*, **31**, 649-655, 1977.
- 18) B. Julesz: Foundations of cyclopean perception. University of Chicago, Chicago, 1971.
- 19) B. G. Cumming and A. J. Parker: Binocular mechanisms for detecting motion-in-depth. *Vision Research*, **34** 483-495, 1994.
- 20) S. Shioiri, H. Saisho. and H. Yaguchi: Motion in depth based on inter-ocular velocity differences. *Vision Research*, **40**, 2565-2572, 2000.
- 21) S. Shioiri, A. Morinaga and H. Yaguchi: Depth perception of moving objects. *B. Javidi and F. Okano (Eds.): 3D television, video and display technology*. 2002.
- 22) 懸樋大介, 塩入 諭, 矢口博久: 奥行き運動知覚における両眼間速度差処理メカニズムの特性. *VISION*, **13**, 209-219, 2001.
- 23) D. C. Brandley, N. Qian and R. A. Anderson: Integration of motion and stereopsis in middle temporal cortical area of macaques. *Nature*, **373**, 609-611, 1995.