

立体／奥行の知覚

塩入 諭

千葉大学 工学部 画像工学科
〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

1. はじめに

視覚の役割は、網膜上の光分布から外界に対する有効な情報を得ることである。これは簡単な視覚を持つ生物にとっては、敵が向かってくるのを察知するなど自身のなすべき行動と直接かかわることもあるであろう。しかし、複雑な視覚処理系を持つ人間などでは、外界に対する有効な情報とは、どこに何があるかを認識するのに必要な情報といってもよい。我々の世界では「どこに」も「何」も3次元の認識となるため、奥行き、立体の知覚の視覚処理の中で占める割合は大きい。両眼視差、運動視差、陰影、輪郭線形状など奥行き、立体の知覚にかかわる視覚手掛かりが数多く存在する¹⁾のは、このような事情のためかも知れない。

多くの手掛かりが存在することから、それらの間でいかに情報が統合されているかという問題が起きてくる。線画に比べ陰影を含む絵画においてより強い立体感が得られるが、これは手掛かりが多いほどより3次元的に知覚されるということであり、異なる手掛かりによる奥行きが統合されることを意味する。奥行き知覚に関する研究は数多く報告されているがそのほとんどは、単一の手掛かりのみをとりだしてその特性について検討するものである。両眼立体視の研究において頻繁にランダムドットステレオグラムが使用されるのはその顕著な例である²⁾。科学における分析的アプローチを考えると、このような研究が多くなされ、それに比べ立体情報の統合についての研究が少ないのも当然かもしれない。しかし、個々の奥行き手掛かりの諸特性が明らかになるのにしたが、それらの奥行

き情報を統合するメカニズムに関する研究への注目度が高まりつつある。

本稿では、まず異なる奥行き手掛かりの間に矛盾がある場合の奥行きについての研究を概観し、それに基づくモデルについて解説する。さらに、奥行きの手掛かり間の相互作用がその奥行きの形成過程に存在することを示唆する実験結果を紹介する。

2. 手掛かりが競合する場合の奥行き知覚

奥行き手掛かりが競合する条件で知覚される奥行きについては、両眼視差と認知性手掛かり（顔は凸面であるなど）、両眼視差と陰影、両眼視差と輪郭線、両眼視差と遮蔽、両眼視差と運動視差、両眼視差と運動情報からの奥行き、両眼視差と大きさ、両眼視差と輝度差の奥行き、運動情報からの奥行きとテクスチャー、運動視差と遮蔽などについての研究がある。

いずれの研究でも、不整合的な手掛かりが同一の刺激に存在する場合の奥行き知覚について知見が得られるわけであるが、それらを一つにまとめることは難しい。報告されている結果は、ある奥行き手掛かりが常に優位であるといった簡単なものではなく、（おそらく刺激条件に依存して）様々な結果が得られている。それらの結果は、I) いずれかの手掛かりが優位でありそのみが知覚されるもの、II) 独立な奥行き知覚がなされるもの、III) 加算的に統合されるものに大別される。I) の典型的な例として顔の面を裏側からみた時の立体知覚がある。お面を裏側から見たときには、通常顔のように凸の面が知覚されるが、この例は両眼視差の奥

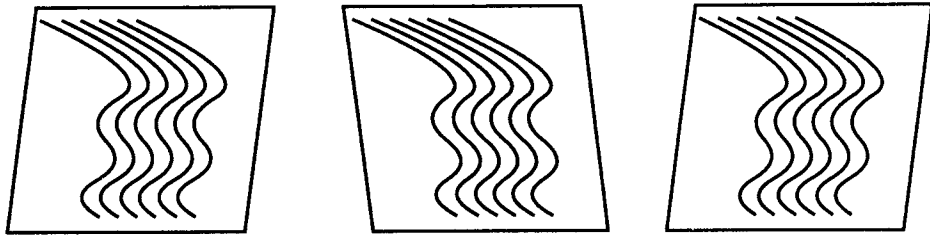


図1 表面輪郭と両眼視差. このステレオグラムは左と中央の図を交叉法で、あるいは中央と右の図を非交叉法で両眼融合するように作られている(以下の図でも同様). 両眼融合すると、図は下部が手前になるような傾きを持つ平面となる視差を与えられている。

行き情報が完全に無視された知覚といえる。このように、他の奥行き手掛かりによって両眼視差が無視される現象は、表面輪郭と競合する刺激条件において顕著である^{3,4)}。図1は紙面に対し下部が手前に傾いている平面上に表面輪郭で曲面を表したものであるが、枠に対しては面の傾きが知覚されるかもしれないが、表面輪郭の曲面の知覚は全く影響されていないと思われる。

一方、ランダムドットステレオグラムを用いた実験では、奥行きは両眼視差によって決定される場合が多い^{5,7)}。その場合、もう一方の手掛かりが陰影、輪郭線などの画像性の手掛かりである場合は、それらはもはや奥行き手掛かりとしては知覚されなくなる。例えば、図2では、このまま観察したときは、白い正方形の上に黒い正方形が重なっているように知覚される。しかし、両眼融像すると黒い正方形は奥に見えるような視差がつけられているため、この重なりは知覚されなくなる。白い正方形はなくなり針金でできた正方形が黒い正方形の上に浮いているような知覚に変わる。このような知覚の変化

は輪郭線や陰影についても報告されている^{5,6)}。

これらの意味するところは、1) 画像性の奥行き手掛かりは必ずしも奥行きとして知覚されない、2) しかしそれはその画像情報が無視されることを意味するわけではなく、別の解釈がなされるということである。これは、両眼視差においては、別の解釈がありえないこととは異なり、画像性の手掛かりのほう両眼視差の奥行きに整合的な情報に変わる可能性が高いとも考えられ、より高次の処理であるためとの推測もできる。ただし、これは顔の認識というかなり高次と思われる処理が、両眼視差に整合的な奥行きを示すことを妨げることと矛盾した考えとなり、容易に処理のレベルについての言及はできない。

次にII)の独立な奥行きが知覚される例であるが、同一の場所に異なる2つの奥行きが見られると断言するとの報告は見当たらない。最もそれに近い現象としては図3に示すランダムドットステレオグラムに対する知覚である。両眼視差でできた図形は、針金でできたの立方体の線画(ネッカーキューブ)である。ここで多くの

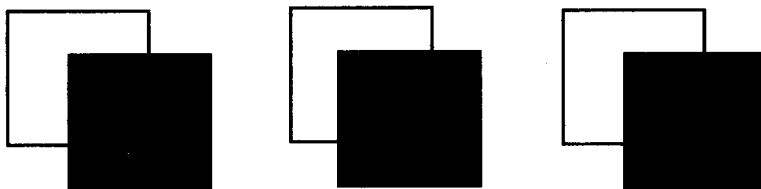


図2 図形の重なりと両眼視差. 両眼融合すると、白い正方形の知覚が変化する。

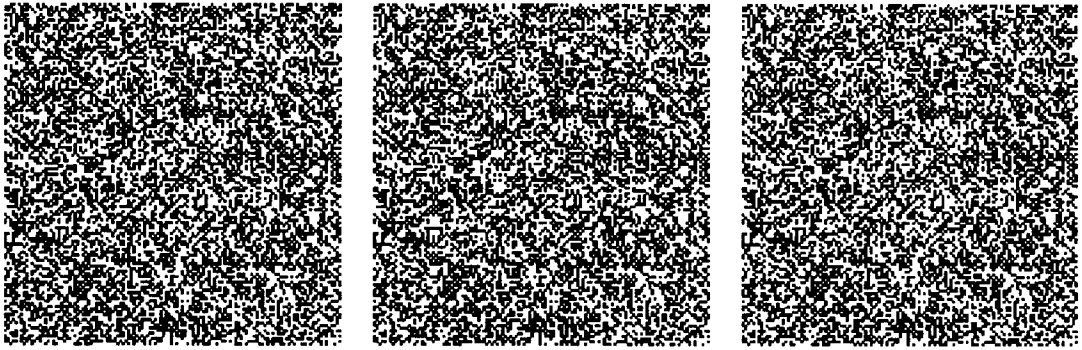
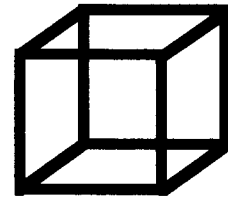


図3 ランダムドットステレオグラムにより描かれたネッカーキューブ。両眼融合することにより、右の線画が奥行きで形成される。



被験者は、背景に対して立方体が浮かんで見えると報告する⁹⁾。両眼視差による奥行きと画像性の奥行きが働いていることになる。図4に示すような、顔の面を裏にし、そこにランダムドットステレオグラムを投影した場合の知覚も同様の現象と考えられる⁹⁾。このとき、顔に関しては視差が反転しても凸の面が見えているが、ランダムドットについては確かに視差による奥行きの違いが生じている。しかも、ランダムドットパターンの背景は顔の凸面にあるように見え、視差でできた正方形部分もやはり凸面的に見える。

最後の異なる手掛かりからの奥行きが加算的に統合されているとの考えは、近年定量的なモデル化が進んでいる（このモデルについては後述する）。Doshier, SperlingとWurst¹⁰⁾は、輝度による奥行き情報と両眼視差による奥行き情報が混在しているときは、それらの重み付け平均を奥行きとするモデルで実験結果をよく説明できると報告する。同様の実験結果は、両眼視差と運動情報からの奥行きや運動情報からの奥行きとテクスチャーなどについても報告されている^{11,12)}。

以上のように、過去の研究は様々な結果を示

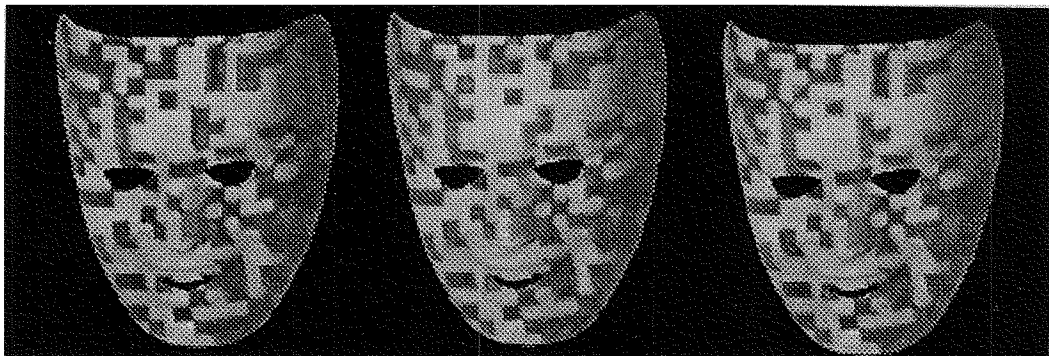


図4 顔の面の裏にランダムドットステレオグラムを投影している。両眼融合することにより、ランダムドットによる視差から額部分の両眼視差図形が浮き上がって見えるが、顔自体は反転してはみえない。

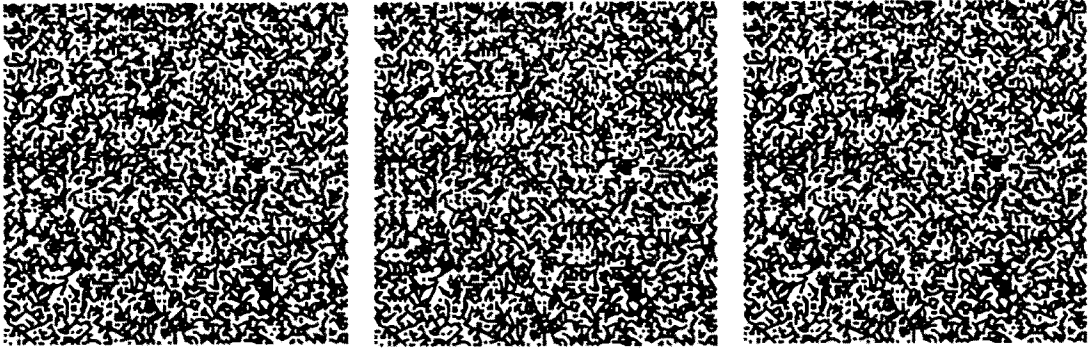
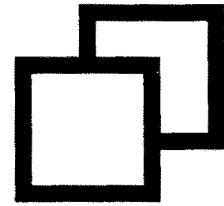


図5 ランダムドットステレオグラムにより描かれた重なり図形。両眼融合することにより、右の線画が奥行きで形成される。



している。このような刺激依存の差に加えて、大きな個人差のあることも報告されている。例えば、図5は図3と同様に線画をランダムドットステレオグラムで形成したものであるが、ここで線画は正方形を重ねた重なり図形である。この刺激に対する知覚は、被験者に依存するという⁹⁾。ある被験者は、両眼視差の示す奥行きを線画を知覚する。この場合、正方形が面として知覚されていないため、重なりによる面の前後関係は知覚しない。しかし別の被験者は両眼視差の線画を知覚しながら、正方形を面として知覚しその重なりも知覚する（ガラス面がランダムドットパターンの手前にあり、そのガラス面上に線画が描かれていて通常の紙面上の線画と同じように重なりが感じられるという）。このような個人差の存在も、奥行き統合の研究結果の多様性の要因であろう。

3. 周波数次元での分割処理

上にあげた例は、両眼立体視と認知の手掛かりあるいは画像性の手掛かりの競合等を調べているものが多い。この組み合わせの場合の知覚に対して、YellottとKaiwi¹⁰⁾は空間周波数次元での並列処理で説明する。つまり両眼立体視は高空間周波数領域で、認知性、画像性の奥行きは低空間周波数領域で感度が高いとの考えである。これは、彼らの顔の面の裏側にランダムドットステレオグラムを写した実験結果と一致している。顔全体は認知性の手掛かりにより凸の面として知覚されるが、局所的には両眼視差の奥行きが知覚され、結果的に両者が混在する知覚がなされるというわけである。

これは、輪郭線の奥行きにより両眼視差の奥行きが感じられなくなっている刺激にもあてはまる。図6の例は、両眼視差の奥行きが表面輪

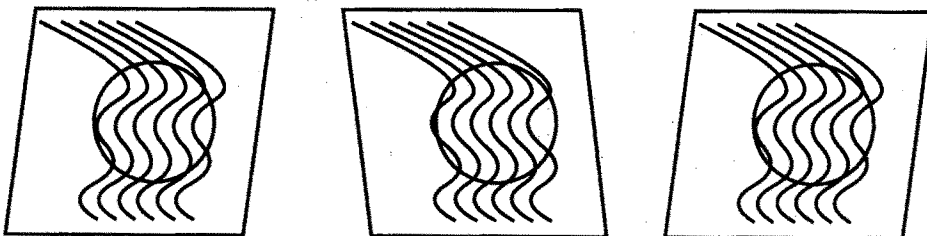


図6 図1の表面輪郭と両眼視差の刺激に視差変化を持たない円を加えた刺激。局所的な視差の差が知覚され、円の方が傾いて見える傾向がある。

郭の奥行きのために知覚されなくなっている刺激（図1）に奥行きの変化がない円を加えただけであるが、ここでは両眼視差による奥行きの変化が知覚される。表面輪郭でできた表面は円上部では奥に、下部では手前に見える。しかし全体としてみれば、視差の変化がない筈の円が傾いて知覚される。局所的には両眼視差の奥行きは知覚されるが、全体的には輪郭の奥行きが優位となるわけである。BrooksとStevens¹²⁾によると、両眼視差の奥行きは明るさと同様に、エッジを強調するような錯視が観察されるという。彼らは、これらの錯視はいずれも帯域通過型の空間周波数特性を持つためとし（事実、両眼立体視の空間周波数特性は0.5から1.0 cpd付近でピークを持つ帯域通過型の空間周波数特性を示す^{13,14)}）、認知性、画像性の奥行き手掛かりが両眼立体視より優位となる理由をここに求めている。このような考えで、一般的にランダムドットパターンなど比較的局所的な視差変化に富んだ刺激で両眼視差の奥行きが優位になりやすい傾向も説明できる。

しかしこの考えは、奥行き統合過程の説明というより、各奥行き手掛かりの空間周波数特性の記述に過ぎないとも受け取れる。あるいは、画像性の奥行き手掛かりと両眼視差は空間周波数同調に大きな差があるかも知れないが、運動からの奥行きと両眼視差では類似しているかも知れない。このような場合の統合については、次にあげる重み付きの線形和のモデルが考えられている。

4. 重み付き線形和

上述のように、奥行き統合についての実験結果は多様であるが、それらをひとつにまとめられる可能性があるのが線形和のモデルである。例えばMaloneyとLandy¹⁵⁾は、奥行き手掛かりの統合はそれぞれの手掛かりから得られた奥行き情報を加重平均してなされると考える。ここでその重みがどのように決めるかが問題となるが、かれらはそれらを測定する方法の提案をしている。

彼らの提案する重みの測定方法とは次のようなものである。いまふたつの奥行き手掛かりaとbがあり、それぞれの奥行きがDa, Db, またその差が Δcue , 知覚される奥行きをD' とおくと、

$$D' = Wa \times Da + Wb \times Db \\ = Wa \times Da + Wb \times (Da + \Delta cue) \quad (1)$$

ただし、Wa, Wbはそれぞれ手掛かりaとbの重みで、 $Wa + Wb = 1$ である。式(1)を変形することから

$$Wb = (D' - Da) / \Delta cue \quad (2)$$

となりD'を測定することで重みWbが測定できる。同様にWaも測定できるので、各手掛かりの寄与の大きさを推定できることになる。

Landy, MaloneyとYoung¹⁶⁾はこの方法でテクスチャーと運動情報の奥行き統合に対する重みを推定している。彼らの結果で興味深いのは、その重みが注目している奥行き手掛かりの信頼性によって変化するという点である。ノイズをのせることでその手掛かりからの奥行きの信頼性を落とすと、全体の奥行きへの寄与率が小さくなるという。重みが手掛かりによって単純に決定されないというの、奥行き手掛かり間に競合がある場合に知覚される奥行きが条件によって一定でないことを説明できる。

重み付き線形和で多くの実験結果が説明できることは示されているが、また単純な線形和のモデルの限界も明らかである。ある手掛かりが優位となりそのみが知覚される条件が存在するという事は、その条件では奥行きの線形な足し合わせはなされていないことを意味する。

この問題を回避するためにMaloneyら¹⁵⁾は、他の手掛かりの奥行きと大きな奥行きの差があるものについては、重みをゼロにするような処理を考えている。これは奥行きの差に対して線形な重みを付す代わりに、統計学的手法の一つであるロバスト推定を用いる方法である。ロバスト推定では、奥行きの差が小さいところでは線形な推定とほぼ同様であるが、差が大きくなるにしたがいその手掛かりの全体の奥行きへの寄与率が小さくなる。ひとつだけかけ離れた奥行き

情報を持つような場合は、奥行き統合過程で無視されるというわけである。

その他の問題点としては、Stevensら⁴⁾の指摘する、両眼視差と輪郭線が異なる奥行きを持つときに、注視する位置や注意の向け方によっていずれかの奥行きが知覚されたりする点が挙げられる。これは明かに線形和のモデルでは説明できない。しかし、奥行き統合がさまざまな処理レベルで行われていることも当然考えられるので、一つのモデルがすべてを説明できないのは当然のことであろう。むしろ、このような定量的なモデルで説明できる範囲を検討していくことが望まれる。

5. 奥行き形成過程での相互作用

ここまで述べた奥行き統合の問題は、主に奥行き量の統合を意味していた。しかし、奥行き統合には別の意味がある。それは単一の手掛かりのみで正確な奥行きを得ることは難しいということに関係している。例えば、両眼視差では対象物までの奥行きが他の手掛かりによって決定されないと形状が決められないし、ネッカーキューブではいずれの部分の手前かはそれのみではわからない。奥行き過程には、別の手掛かりで得られた情報を利用して奥行きを決定するという処理も含まなければいけないことになる。この点については、Maloneyら¹⁵⁾が言及しているが、多くはわかっていない。しかし、もしそのような種類の奥行き統合を考えるとすれば、それぞれの手掛かりによる奥行き形成過程に対して、別の奥行き手掛かりの情報が関与していることになる。これを支持する実験結果がいくつか報告されている^{5,6)}。

ここでは輝度の奥行き両眼立体視形成時間への影響を示す例として、我々研究室で行った実験の一例を示す¹⁶⁾。刺激はランダムドットステレオグラムであり、視差でできた2本の視差バンド（一方は手前となる8分の視差がつけられ、他方は無相関であるため奥行きは決まらない）と輝度差でできた2本の輝度差バンドが含まれる。ここで輝度差バンドは周辺部より明

るい条件と暗い条件があり、明るい条件では視差バンドと同じ位置に存在する条件とバンドの長さの半分だけづれた位置にある条件の2種類がある。視差バンドは常に手前となる奥行きをつけられるので、明輝度バンドが視差と同じ位置にある条件が奥行き整合刺激、他の2条件は不整合刺激となる（図7）。被験者の課題は上下2本のバンドのうちいずれが手前になる両眼視差を持つかを判断することであり、恒常法により提示時間による正当率の変化を測定した。図8は1名の被験者の結果である。いずれの条件でも提示時間の増大につれて正当率が上昇しているが、正当率が100%付近に達する時間を比較すると、整合条件で他の2条件より短時間となっている。この傾向は他の4名の被験者でも同様であった。

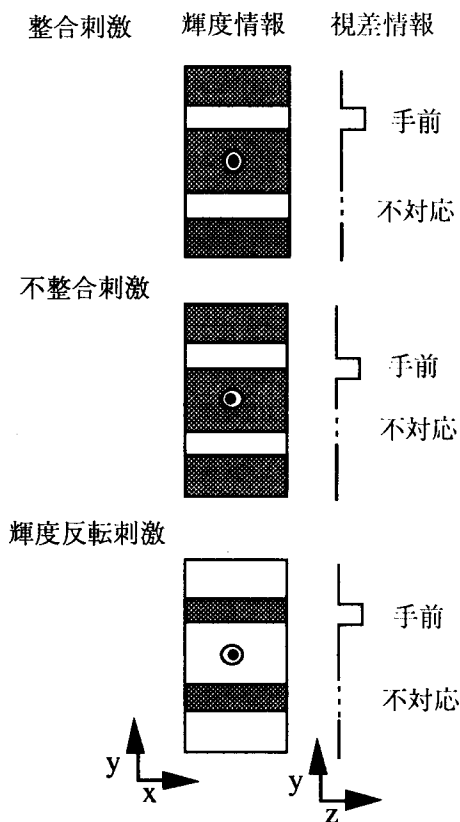


図7 輝度による奥行きと両眼視差による奥行きが整合的である条件（上）と不整合的である条件（中、下）¹⁶⁾

同様に、塩入と佐藤⁹⁾は、ランダムドットステレオグラムの輪郭線を変化させ両眼視差と異なる奥行きを持たせた条件で、両眼立体視の形成時間を測定し、輪郭線が両眼視差に対し整合的な奥行きを持つ場合に比べ、不整合的な奥行きを持つ条件では両眼立体視の形成時間が長くなることを見出ししている。類似した結果が、陰影情報に基づく奥行きに対しても得られている⁶⁾ことから、両眼立体視の形成は画像性の手掛かり一般から影響を受けているとも考えられる。

これらの実験では両眼立体視の形成に必要な時間を測定しているわけであるから、知覚される奥行き量が輪郭線の持つ奥行きにより変化するという現象と本質的に異なる。両眼視差の奥行き形成過程に他の奥行き手掛かりが影響していることになるからである。これは、初期視覚において、画像の基本的な属性が並列に処理されているとの考え方¹⁷⁾とは一致しない。このような並列性は脳視覚野での機能の局在に根拠を置くが、解剖学的な知見によれば機能の局在とともに様々な種類のフィードバックや相互連絡があるという。したがって、両眼立体視の形成に他の奥行き手掛かりの影響があることはそれほど不思議ではない。

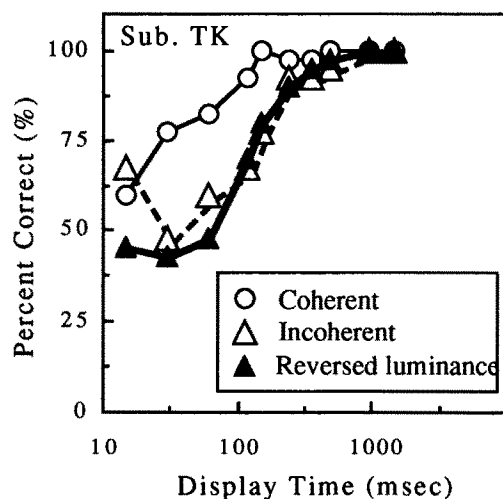


図8 正当率の提示時間ともなう変化。白丸が整合条件、白三角が不整合条件、黒三角が輝度反転条件の結果を示す。

このような両眼立体視形成過程への画像性の奥行きの影響が事実であるとすれば、はじめから画像性の奥行きが与えられている条件では、両眼立体視の形成時間が短縮されると考えられる。実際に、我々は、上記の実験を、刺激提示に先立ち輝度による奥行きの情報を加えた条件で繰り返すことにより、先行する輝度刺激が両眼立体視の形成時間を短縮するとの結果を得た。図9はあるの被験者に対して、先行刺激の提示時間と両眼立体視形成時間の関係を示している(75%の正当率に達する時間を両眼立体視形成時間としている)。先行刺激が150ミリ秒程度までは、先行刺激が長くなるにつれて両眼立体視形成時間が短くなるという予想どおりの結果である。しかし、その後さらに先行刺激の提示時間が増加すると、再び形成時間は長くなる点は予想外の結果であり、これは今後の検討課題である。

6. まとめ

立体・奥行き知覚の分野は、両眼立体視をはじめとして運動や陰影からの立体形状の再構築など単独の手掛かりに関しては精力的に研究されている。しかし、本稿で述べたようにそれらの統合に関する研究はその研究手法が模索されている段階といえる¹⁸⁻²²⁾。今後さらに多くの新しいアイデアが待たれる分野であろう。

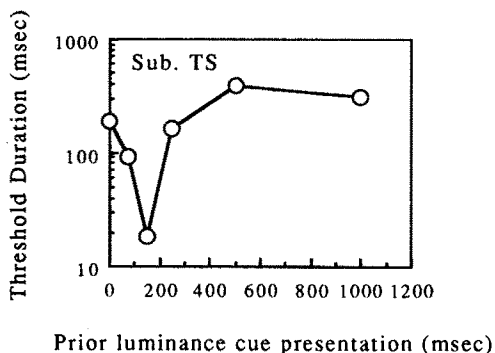


図9 先行輝度刺激の提示時間による両眼立体視形成時間(75%の正当率を与える提示時間)の変化

文 献

- 1) 例えば, R. Sekuler and R. Blake: Perception. Alfred A. Knopf, New York, 216-250, 1980;
塩入 論: 3次元空間の知覚. 日本写真学会誌, 54, 49-58, 1991.
- 2) B. Julesz: Foundation of cyclopean perception. University of Chicago Press, Chicago, 1971.
- 3) K. A. Stevens and A. Brookes: Inregrating stereopsis with monocular interpretations of planer surfaces. *University of Oregon Technical Reort, CIS-TR-86-05*, 1986.
- 4) K. A. Stevens, M. Lees and A. Brookes: Combining binocular and monocular curvature features. *Perception*, 2, 425-440, 1991.
- 5) 塩入 論, 佐藤隆夫: 輪郭線形状の両眼立体視におよぼす影響. *テレビジョン学会誌*, 印刷中.
- 6) 塩入 論, 佐藤隆夫: 陰影の両眼立体視におよぼす影響. *光学*, 22, 33-41, 1992.
- 7) A. van den Enden and H. Spekreijse: Binocular depth reversals despite familiarity cues. *Science*, 244, 959-961, 1989.
- 8) P. Cavanagh: Reconstructing the third dimension: interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 37, 171-195, 1987.
- 9) J. I. Yellott and Jr. L. Kaiwi: Depth inversion despite stereopsis: the appearance of random-dot stereograms on surfaces seen in reverse perspective. *Perception*, 8, 135-142, 1979.
- 10) B. A. Doshier, G. Sperling and S. A. Wurst: Tradeoffs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure. *Vision Research*, 26, 411-434, 1986.
- 11) E. B. Johnston, B. G. Cumming and M. S. Landy: Integration of stereopsis and motion shape cues. *Mathematical Studies in Perception and Cognition*, New York University, 1992.
- 12) A. Brookes and K. A. Stevens: The analogy between stereo depth and brightness. *Perception*, 18, 601-614, 1989.
- 13) C. W. Tyler: Depth perception in disparity gratings. *Nature*, 251, 140-142, 1973.
- 14) 長田昌次郎: 正弦波状の奥行きパターンによる両眼立体視の空間周波数特性. *テレビジョン学会全国大会予稿集*, 5-6, 1976.
- 15) L. T. Maloney and S. M. Landy: A statistical framework for robust fusion of depth information. W. A. Pearlman (ed): *Visual Communication and Image Processing IV, Proceedings of the SPIE*, 1199, 1154-1163, 1989.
- 16) S. M. Landy, L. T. Maloney and M. J. Young: Psychophysical estimation of the human depth combination rule. P. S. Schenker (ed): *Sensor Fusion III: 3-D Perception and Recognition, Proceedings of the SPIE*, 1383, 247-254, 1991.
- 17) 例えば S. Zeki and S. Shipp: The functional logic of cortical connections. *Nature*, 335, 311-317, 1988.
- 18) 小重忠司, 塩入 論, 久保走一: 単眼奥行き情報の両眼立体視への影響. 第39回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 3, 799, 1992.
- 19) 長田昌次郎: 異なる手がかりによる奥行き知覚の時間特性. *日本心理学会第45回発表論文集*, 193, 1981.
- 20) 長田昌次郎: 立体映像における両眼視差と運動視差との相互作用効果. *3D映像*, 5(2), 73-82, 1991.
- 21) 塩入 論: 3次元知覚における手がかり間の相互作用. *VISION*, 2, 48-55, 1990.
- 22) 一川 誠, 斎田真也: 運動視差と両眼視差の情報矛盾時の奥行き知覚. *VISION*, 2, 96, 1990.
- 23) 魚森謙也, 西田真也: KDEの自己順応の発生レベル. *VISION*, 5, 61, 1993.