

立体／奥行知覚の基礎

塩入 諭

東北大学 電気通信研究所
〒980-0812 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

1. はじめに

立体映像が注目され、3D 映画も人気が高い。立体映像はこれまでも何度か大きく注目されたことがあるが、最近の 3D 映画は過去のものと比較して見やすさの点で改善している。そこには立体カメラ、CG 制作環境のハードの技術に加え、コンテンツ制作技術の向上があると考えて間違いない。成功した 3D 映画では、効果的な映像表現が無理のない形で利用されているようである。一方、3D テレビの家庭への普及の速度は鈍いという。3D 映画の成功は、関連技術が一般に普及するのに十分なレベルに到達しつつあることを裏づけているが、立体映像が近い将来に広く家庭へ普及するのか、一過性のブームの後、さらなる技術革新を経ての普及となるのかを予想することは難しい。

このような状況において、立体視の、しかも情報通信関連の研究所に所属する研究者としては、3D 映像技術に関連する研究者／技術者に対して、人間の立体知覚特性を参考にしやすい形で情報提供することは責務であると感じる。人間の立体視特性を十分に理解し視覚特性を考慮することは、より効果的で快適な 3D 映像の実現に不可欠である。本稿では、奥行知覚に影響を与える諸条件について概説し、両眼立体視に適切な刺激条件や観察条件の利用について考察する。

2. 両眼視差検出と時空間特性

2.1 両眼立体視の基礎

両眼立体視は、両眼網膜像の違いである両眼視差^{*1}による奥行知覚である。

図 1 は、両眼視差と奥行の関係を示す。奥行 d が両眼視差 ϕ に近似的に比例することから、両眼視差から d を推測できることがわかる (ϕ は視角で表現されている)。ただし、絶対的な奥行を知るためには対象までの距離 D を知る必要がある。

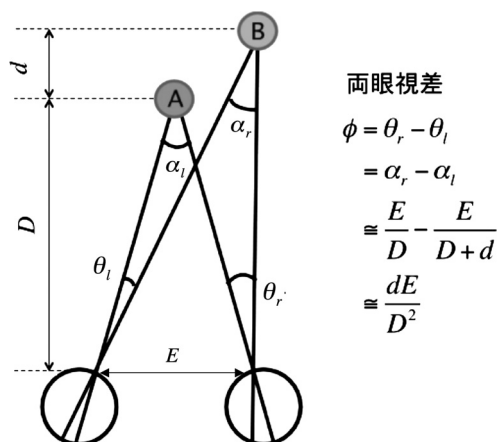


図 1 両眼視差 ϕ と奥行 d の関係。A を注視しているときの、A と B の網膜像での水平距離が左右眼で異なる。 ϕ はその差を視角で表現する。E は眼間距離である。

^{*1} 両眼視差は、両眼網膜像差 (disparity) を指す場合と、視線方向によらないで対象と眼球位置で決まるパララックス (parallax) を指す場合がある。左右の網膜像の違いという意味で、両眼網膜像差の方が正確な表現であるが、本稿では慣習に従い両眼視差と呼ぶ。

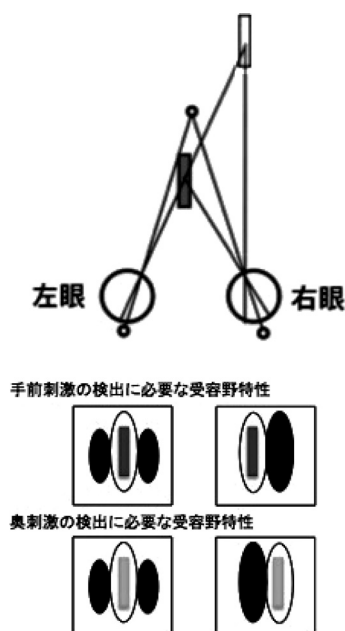


図2 両眼視差検出細胞のモデル。左右眼の受容野が水平方向にずれている場合に、特定の両眼視差に選択的な応答特性を持つ。ここでは受容野の中心はずれていないが、受容野内の興奮／抑制の配置がずれている。受容野特性をガボール関数で表し、その位相の差でそのずれを表現するモデルを作ることができる。

両眼視差に基づく立体視は、複数の階層的／並列的处理過程によって最終的な知覚が形成されると考えられる¹⁾。その最初の段階は、左右網膜像の局所的な違いに基づく視差を検出であり、そのモデルとして視差エネルギー検出モデルが提案されている^{2,3)}。図2は視差エネルギーモデルの基本部分である、両眼視差検出細胞のモデルを説明する。左右眼の受容野特性に違いがある両眼性細胞によって両眼視差を検出するモデルとなっている^{*2}。受容野は興奮性の応答をする部分と抑制性の応答をする部分で構成されているが、その位置が左右眼でずれている。それによって特定の両眼視差のある刺激に対して選択性を持つことになる。視差エネルギーモ

^{*2} 実際は、位相の異なる受容野特性を持つ別の細胞の応答との二乗和をとることで、視差エネルギーの検出となる。それにより受容野内のどこが刺激されても視差の検出が可能となる。

デルは視差検出を空間フィルターとして機能するため、このモデルは両眼立体視の時空間特性の基礎に視差検出細胞の時空間特性があることも意味する。時空間特性は画像の見えを推測する上で基礎となる特性であり、3D映像については奥行知覚に対する特性を知ることが必要である。後述するように視差エネルギーモデルは、両眼立体視の時空間特性を理解するためにも有効である。時空間特性以外にも両眼立体視には多くの興味深い特性が知られているが、それらについては他の資料⁴⁻⁶⁾を参照されたい。

2.2 時空間特性

視覚系の時空間特性といえば、一般に網膜に与えられた刺激の明暗パターン（光の分布に基づく輝度変化）に対する解像度や周波数特性のことを指す。視覚刺激は網膜で受光する光の時空間変化と考えることができるため、輝度コントラストの検出能力（コントラスト感度）を実験的に調べることで基礎的な時空間特性が求められる⁷⁾。両眼立体視においてもその点は共通であるが、それに加えて奥行（視差）の変化もある。したがって奥行変化についての時空間特性を知る必要もある。また、輝度の時空間特性についても、奥行量の影響を考慮する必要がある。これらを総合的に扱うことで、3D映像をみたときの奥行の見え方を評価することができる。これは、初期視覚特性に基づく評価といえ、最終的な奥行の知覚に対応するわけではないが⁸⁾、解像度や周波数特性が画像評価に有効であることと同程度にその有効性が期待できる。以下奥行次元および輝度次元、それぞれについて基本的な特性を紹介する

2.2.1 奥行次元の時空間特性

奥行の時空間特性の評価は、奥行が正弦波状に変化する刺激を使う。多くの実験ではランダムドットステレオグラムを用いて視差変化のみで奥行変調を行う。図3は、知覚できる最小の奥行量（立体視力）を奥行面変化の周波数の関数として表す。縦軸は上にいくほど小さい値となり、視差検出感度（立体視力）が高いことを示す。複数の研究があるが、いずれも最大感度

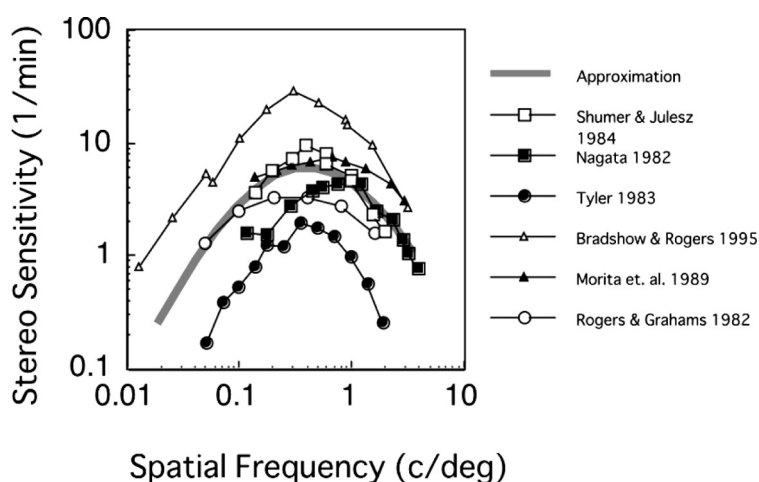


図3 視差検出感度（立体視力）の奥行変調空間周波数特性. 各シンボルは異なる報告に基づくデータで、灰色の実線は実験式による予測値（詳細は Shioiri ら⁷⁾を参照のこと）.

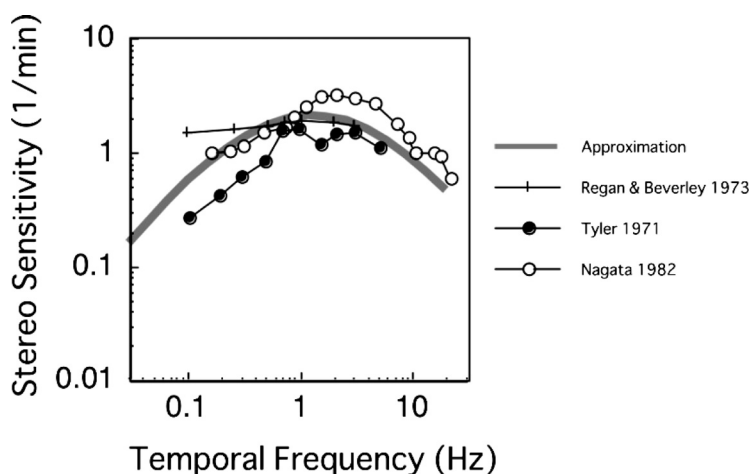


図4 視差検出感度（立体視力）の奥行変調時間周波数特性. 各シンボルは異なる報告に基づくデータで、灰色の実線は実験式による予測値（詳細は Shioiri ら⁷⁾を参照のこと）.

は 0.5 c/deg 付近の帯域通過型の特性を示す. 灰色の曲線は、すべての結果を利用して空間周波数特性をモデル化した実験式であり、両眼視差量を視角、分で表現した立体視力、 m は次式で表現される⁷⁾.

$$\log m = A(B + (\log f - \log f_0)^2)^{0.5} + C$$

ここで f は空間周波数、 A と B は関数の形状を表す変数であり、 f_0 と C は感度最大の座標を表す. それぞれのデータセットに対して共通の A , B を用いて f_0 と C を個別に求めた上で、 f_0 と C の平均を取ったものが図中の曲線である. A , B ,

f_0 , C は 2.46, 1.69, 0.44, 3.95 である. 感度の最大は 0.44 c/deg であり、これは輝度パターンの検出に対する空間周波数特性の感度の最大 3 cpd より 1 桁低い. 図4は、奥行変化の時間周波数特性の結果である. やはり帯域通過型の特性を示し、感度の最大は 1 Hz 付近である. 曲線は空間周波数特性と同様に求めた実験式であり、各変数の値は A , B , f_0 , C の順に 1.23, 2.12, 1.52, 2.30 である. 最大感度は 1.5 Hz であり、これは輝度パターンの検出に対する時間周波数特性の感度の最大 8 Hz よりずっと低い. これら

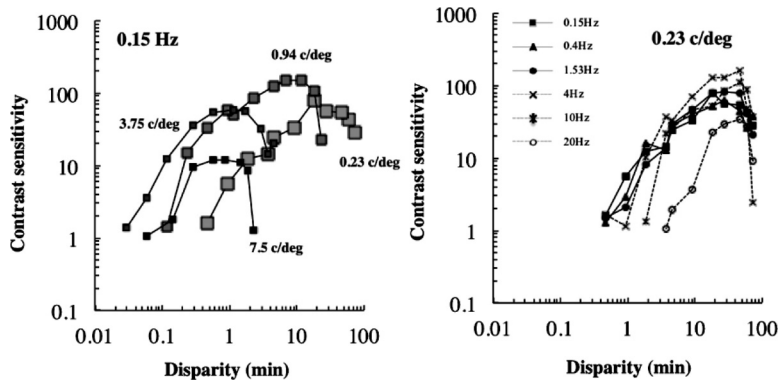


図5 両眼視差検出のコントラスト感度. Lee らの実験結果の一部⁹⁾.

の実験式を利用すると、立体映像に含まれる視差情報から奥行の見え方を予測することができる。ただし、時間特性と空間特性が相互に依存することも考えられるため、将来的には時間周波数を変えて空間周波数特性を評価することも必要である。

2.2.2 輝度次元の時空間周波数特性

立体視に対しても他の視覚特性と同様に、輝度変化に対する時空間特性を考える必要がある。それは、刺激中の輝度成分の時空間周波数特性を変化して、奥行判断に対するコントラスト感度（奥行知覚が可能な最小のコントラストの逆数）を測定することで評価できる。図5は、正弦波格子縞の刺激を用いて刺激の空間周波数、時間周波数、および視差を系統的に変化してコントラスト感度を測定した研究の結果である⁹⁾。ここでは、視差は格子縞の刺激面に対して一定値を与えるため、奥行変調の影響は考えなくてよい。

図5左図は異なる空間周波数に対して、視差変化に伴うコントラスト感度の変化を示す。時間周波数は0.15 Hzの条件である。空間周波数が低いほど大きな視差に感度を持つようになることがわかる。いわゆる「大きさ視差相関」と呼ばれる特性である。この特性は視差エネルギーモデルからも予測される。図2を見ると大きな視差を検出させるためには、大きな受容野が有効であることが理解できる。これは、大きさの異なる受容野を持つ複数の神経細胞群が視

差を検出しているとの考え、つまり空間周波数チャンネルの存在を支持する^{10,11)}。図5右図は、空間周波数を固定し、異なる時間周波数に対して視差に伴うコントラスト感度の変化を示す。時間周波数が増加しても、最大感度を与える視差はほとんど変わらない。しかし感度自体は時間周波数に依存して変化し、4 Hzで最大となる。この時間周波数に依存した感度変化は、空間周波数によっても異なり、高周波の縞に対しては時間的に低周波であるほど感度が高くなる。

以上のように、視差と空間周波数には一定の関係があるが、時間周波数には依存しない。しかし、時間周波数特性は空間周波数に依存し、低空間周波数の刺激は帯域通過型の時間特性を示し、高空間周波数の刺激は低域通過型の時間特性を示す。これらの結果は、3D映像の評価に利用することができる。例えば、大きな視差を持つ対象では、静止映像よりも動画においてよりよく奥行が知覚されることになる。

3. 見かけの観察距離

両眼立体映像には、その見え方に関して平面映像と異なる問題がある。箱庭効果（劇場効果）と書き割り効果はその典型である。両眼視差の原理の図（図1）からわかるように、これらの効果に観察距離が関連することは間違いなく^{4,12,13,16)}。ここでは、立体知覚に影響する距離を、物理的な距離ではなく知覚される距離の問題として捉える考え方を説明する¹⁴⁾。運動視差

など他の要因の指摘もあるがここでは触れない^{12,13,15)}。

3.1 箱庭効果

箱庭効果は、立体表示システムにおいて人物などがミニチュアのように見える効果である。幾何学的な関係から、両眼立体視による奥行量は両眼視差に比例し、対象までの距離の二乗に反比例する（図6下図の曲線）。視差が一定であれば、対象までの距離が遠くなるとその二乗に比例して奥行量が大きくなることになる。箱庭効果は小さく見えるのであるから、奥行量を過小評価した結果と考えることができる。例えばディスプレイまでの距離が実際の観察に比べて近い場合には起こりうる事態である。

注意が必要であるのは、大きさが距離と関連するのは平面映像でも同じ点である。実際の距離と異なる距離で観察する映像は、実際と異なる大きさに見えてもよい。立体映像が異なるのは距離との関係である。網膜像の大きさが一定であれば、対象物の大きさは距離に比例して大きくなると推定される（図6下図の直線）。しかし、平面映像において箱庭効果のような現象を聞くことはほとんどない。

ここでは、平面的大きさ（視線に垂直な面上での大きさ）と奥行方向の大きさの関係が、箱庭効果などの立体映像の問題を生起しているとのモデルを考える。一般に実物の観察と同じ条件（視差と網膜像の大きさ）を実現できれば、

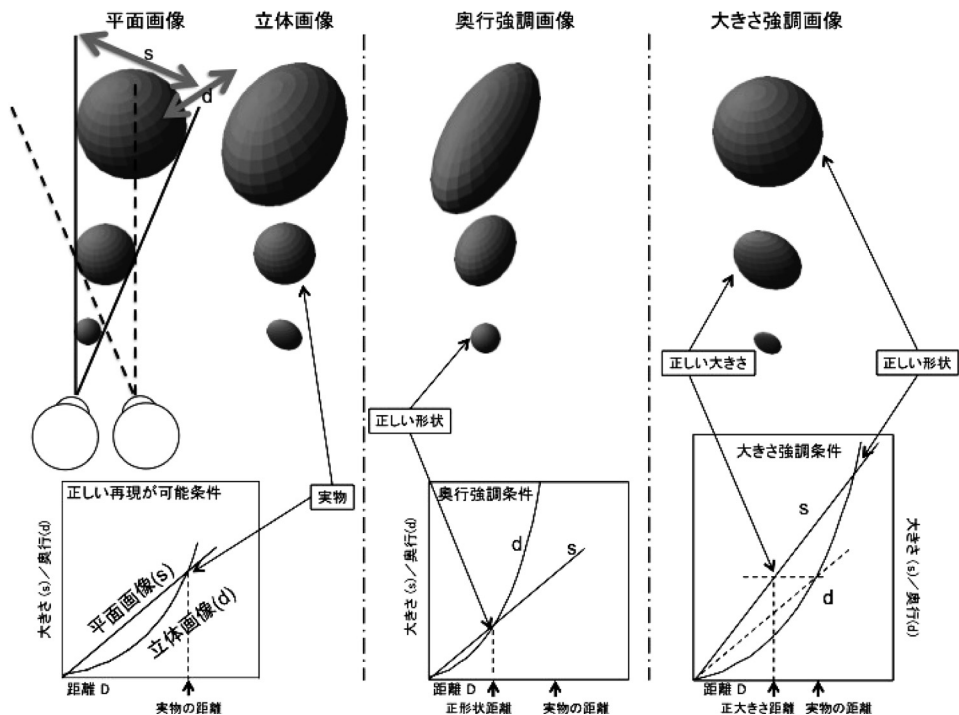


図6 箱庭効果と書き割り効果の説明。実物の観察と同じ条件で観察できる場合は、実物に対するものと同じ知覚がなされる（正しい再現が可能条件）。箱庭効果は、撮影時のカメラ間距離を大きくして奥行強調した場合（奥行強調条件）に生じやすい。この条件で観察者が正しい形状を知覚したとする（図6中図：「正しい形状」の場合）。正しい形状とは、平面的大きさと奥行の比が実物と同じことを意味する。この例でそれを実現する距離は実際より近くなり、その結果、対象物を実物より小さく知覚されることになる。書き割り効果は、ズームにより大きさを拡大した場合（大きさ強調条件）に生じやすい。この条件で観察者が実物と同じ大きさを知覚したとする。この例でそれを実現する距離はズームなしの画像で正しい形状となる距離とする。そこでは大きさと奥行の比は実物と異なり、相対的に奥行が小さい（図6左図：「正しい大きさ」の場合）。その結果、対象物は奥行方向につぶれたものとして知覚されると説明することができる。

箱庭効果などの問題はない。その条件では、平面方向と奥行方向がいずれも正しく知覚される距離は一意に決まる（図6左図）。いま2つのカメラ間の間隔を長く取り両眼視差を強調する映像を作ったとする（奥行強調条件）と、その場合でも実物と同じ形状、つまり平面サイズと奥行量の比率が実物と同じ状況は一意に決まる。そしてそれは実際より近い距離であり、箱庭的に知覚はその結果であると説明することができる（図6中図）。

3.2 書き割り効果

書き割り効果は、実物を取った立体映像が書き割りのように見えるものである。書き割りは舞台セットの平面の背景画なので、奥行が過小評価されていることを意味する。箱庭効果と異なるのは、形状が正しくなくなることである。奥行がつぶれて見えるのであるから、奥行が平面サイズよりも相対的に小さく知覚されることになる。図6からわかるように、奥行がつぶれて評価されるのは、正しい距離より近くに見えるときである。顕著な書き割り効果は、比較的遠くの対象をズームした場合に生じる。それは視差を変えずに映像を平面的に拡大する条件である（大きさ強調条件）。この状況でも実際より遠くにあると仮定すると正しい形状と知覚されてもよいはずである（図6右図：「正しい形状」の場合）。しかし、その場合対象の大きさは非常に大きいことになる。対象が人間である場合は極端に大きく知覚するのは不自然であり、そのような知覚はしないであろう。むしろ実際の人と同じ大きさ知覚をする可能性がある（図6右図：「正しい大きさ」の場合）。その場合、対象までの距離は近いと認識され、相対的に奥行量が小さくなる。これによって前後のつぶれた書き割り効果が説明できる。

実物と同じ形状として知覚される条件で箱庭効果が、同じ大きさに知覚される条件で書き割り効果が生じる可能性について述べた。いずれも知覚される距離に依存して大きさと奥行の知覚が変化するという説明である。ここで知覚距離が問題であるという表現をしたのは、物理的

な距離に対して視覚処理過程における距離という意味である。実際には主観的な距離の知覚が問題であるとは限らない^{*3}。問題となるのは、大きさと奥行を決めるために利用されている（無意識的なものであるかもしれない）距離判断、スケール距離（scaling distance）と考えるべきである¹⁴⁾。

4. 絵画的手掛りとの統合

通常視覚像には複数の奥行手掛りが含まれ、それらに基づき奥行が知覚されている。奥行手掛りの間の相互作用、統合過程については、さまざまな形体が確認されている^{4,6,18-20)}。例えば筆者の過去の解説記事では、図7を提案している¹⁸⁾。ここでは、複数の異なる奥行手掛りに基づく処理の結果の統合過程と各処理過程同士の相互作用を含んでいる。また統合過程として単一の奥行知覚のみを考えるのではなく、奥行の異なる側面（奥行量、面の傾きなど）を考慮している。それらの詳細について前稿を参照していただくとして、ここでは奥行量の統合過程に注目し、立体映像を扱う上でその有用性について述べる。

異なる二つの奥行手掛りを視覚刺激に与え、その効果を定量的に評価する研究は数多い²¹⁻²⁵⁾。それらの中には処理過程の間の相互作用に注目するものもあるが、多くは奥行量の加算効果を明らかにするものである。特に両眼視差による奥行と運動やテクスチャーからの奥行などに関しては、線形加算で実験結果を予測することができるとの報告もある²⁶⁻²⁸⁾。このような加算処理は、各手掛りの信頼性に基づく相対的な寄与率を考慮した上で意味がある。一方、ある刺激の持つ奥行量を、他の手掛りで評価することもできる。筆者らは、輝度コントラストによる奥行量を、両眼視差に基づく奥行で評価でき

^{*3} 例えば、月の錯視は、距離と大きさの知覚が関連していると考えられるが、大きさは大きく、距離は近く知覚されることがあり、大きさ距離矛盾と呼ばれる。大きさ評価に利用される距離と主観的な距離評価の結果が同じ処理によると考える必要はない¹⁷⁾。

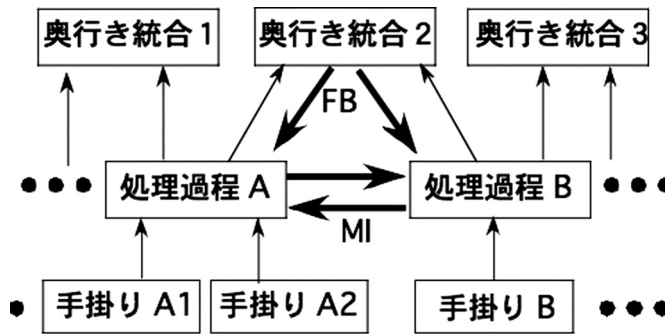


図7 奥行統合過程の模式図。複数の手掛りに対して、それぞれに対応する処理系がある。ここでは、複数の手掛りが影響するものも考えている。それぞれの処理系の結果が奥行の統合過程に送られ、重み付き平均処理によって統合される。それぞれの処理過程は完全に独立ではなく、各処理過程相互の間の相互作用 (MI)、および統合過程からのフィードバック (FB) によって相互に影響を与える。

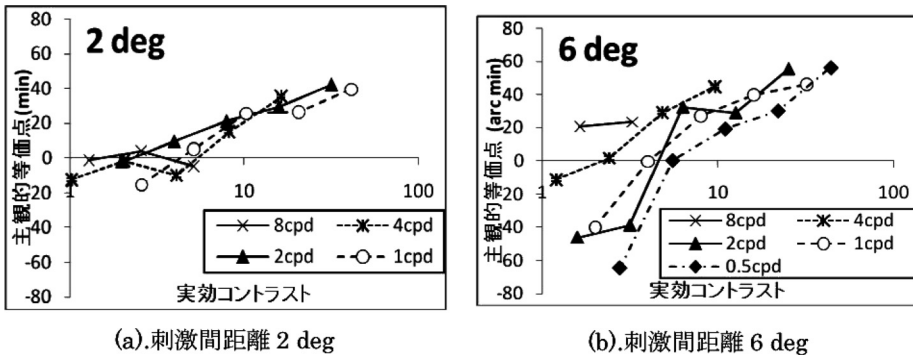


図8 輝度コントラストの奥行効果。図aはテスト刺激と参照刺激の間の距離が2度の結果、図bは距離が6度の結果。横軸の値はコントラスト閾値の倍数(実効コントラスト)、縦軸は奥行マッチングにより求めた参照刺激の視差量。シンボルの違いはテスト刺激の空間周波数の違いを示す。

ることを確認した^{29,30)}。テスト刺激としてガボールパッチを用いて、そのコントラスト変化に伴う見かけの奥行の変化を、参照刺激との奥行マッチングによって求めた。テスト刺激と同一平面に見えるように参照刺激の両眼視差を調節し、その値をコントラストの関数として得た。図8は、結果の一例である。1名の被験者の結果で、コントラストを閾値付近からその30倍程度に変化するとき、両眼視差で2度位の範囲で奥行が変化することを示す。一般に両眼視差が有効に利用できる上限が1度程度であることを考えると、この値はかなり大きなものであり、コントラストの奥行への効果は両眼視差に匹敵することともいえる^{*4)}。

この結果は、輝度コントラストからの奥行が

両眼視差による奥行と加算的に統合されていることを意味し、コントラストの対数値と両眼視差で評価した奥行量が近似的に線形関係にあることもわかる。これは、コントラストを変えるだけで、両眼視差を変化することなく立体感を変えることができることを意味する。実際に比較的単純な画像処理でステレオ映像の奥行を制御することができ、自然画像への適用も試みられている³¹⁾。

ここでもう一点興味深い事実について指摘したい。実験からは輝度コントラストは明確な奥

*4 最終的に10名の被験者に対して同様の傾向が得られた。ただし、コントラストに依存して変化する両眼視差の範囲には個人差も大きく、全被験者の平均では1度程度である。

行手掛かりになることは明らかであるが、それが実際に奥行によって変化する状況はそれほど一般的でない。輝度コントラストは、大気遠近法的手掛かりとされ、遠くの山のコントラスト低下がその典型である。近い距離範囲においても、空間解像度の限界を考えると詳細情報については距離に依存して見かけのコントラストは変化する（遠い場合に低下する）。一方、我々の見るシーンにはさまざまな面があることを考えると、網膜像に奥行と関係ない輝度コントラスト変化が含まれることは多い。言い換えると、コントラストからの奥行推定は奥行知覚に貢献するよりも混乱を招く可能性も高い。しかし、輝度コントラストによる奥行知覚の混乱を経験することはほとんどない。その理由は、両眼視差手掛かりが近接する刺激において特に有効に働くことにあると思われる。奥行を評価するための参照刺激と評価するテスト刺激の間隔を狭くすると、両者の両眼視差の違いに対して感度が上昇し、他の奥行手掛かりを無視して両眼視差の奥行のみで評価する傾向がある。これは図8のテスト刺激とそれを評価する参照刺激の間の距離の影響からもわかる。両者が近い場合（2度）は遠い場合（6度）に比べて、コントラスト変化による奥行変化が顕著に小さい。日常触れるシーンでも、近い位置でコントラストの変化があっても、両眼視差によって正しく奥行が知覚されれば問題にならない。むしろその場合には、コントラストの変化を奥行の違いとして認識しないことになり、物体表面の特性の違いであると正しく認識することを助けるであろう。複数の奥行手掛かりが相補的に機能する可能性は他の状況にも確認されていて^{32,33)}、奥行知覚の一般的な特性といえるかもしれない。

5. ま と め

奥行知覚の研究は多岐にわたり多くの知見が積み上げられている。両眼立体視については、本稿で述べた知見を利用できれば任意の刺激に対する奥行をある程度の精度で推定することが可能である。今後3D映像を見る機会はますます

増えることを考えると、視覚研究で得られた知見を3D映像技術に十分に活用することが望ましい。本稿がその一助になれば幸いであるが、文章による解説が十分であるとは思えない。おそらく、視覚特性に基づく3D映像評価するシステムを構築することがもっとも有効な手段であると考え、これは、今後検討したい課題である。

一方、奥行知覚の研究については、まだまだ多くの問題が残されている。特に絵画的奥行手掛かりの多くは両眼視差や運動情報のようにランダムドット刺激などを用いて定量的に扱うことが難しく研究の進展には時間が必要である。奥行知覚研究の歴史は決して短くはないが、いまだに挑戦的な課題を多く含んでいる。将来の3Dディスプレイの設計やコンテンツ制作の指針を与えためにも、奥行／立体知覚に関するさらなる研究が望まれる。

文 献

- 1) A. Anzai and G. C. DeAngelis: Neural computations underlying depth perception. *Current Opinion in Neurobiology*, **20**, 367–375, 2010.
- 2) I. Ohzawa, G. C. DeAngelis and R. D. Freeman: Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, **249**, 1037–1041, 1990.
- 3) G. C. DeAngelis: Seeing in three dimensions: the neurophysiology of stereopsis. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 80–90, 2000.
- 4) I. P. Howard and B. Rogers: *Binocular Vision and Stereopsis*, Oxford University Press, Oxford, 1995.
- 5) 塩入 諭（編）：視覚Ⅱ，朝倉書店，2007.
- 6) 日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック，朝倉書店，2000.
- 7) S. Shioiri, A. Morinaga and H. Yaguchi: Binocular depth perception for moving objects. *B. Javidi and F. Okano (eds): 3D television, video and display technology*, Springer-Verlag, Berlin, 397–426, 2002.

- 8) J. Read: Early computational processing in binocular vision and depth perception. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, **87**, 77–108, 2005.
- 9) S. Lee, S. Shioiri and H. Yaguchi: Stereo channels with different temporal frequency tunings. *Vision Research*, **47**, 289–297, 2007.
- 10) S. Shioiri, T. Hatori, H. Yaguchi and S. Kubo: Spatial frequency channels for stereoscopic depth. *Optical Review*, **1**, 311–313, 1994.
- 11) Y. Yang and R. Blake: Spatial frequency tuning of human stereopsis. *Vision Research*, **31**, 1177–1189, 1991.
- 12) 繁樹博昭, 佐藤隆夫: 書き割り効果のメカニズム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **10**, 249–256, 2005.
- 13) H. Yamanoue, M. Okui and I. Yuyama: A study on the relationship between shooting conditions and cardboard effect of stereoscopic images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **10**, 411–416, 2000.
- 14) E. B. Johnston: Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, **31**, 1351–1360, 1991.
- 15) 名手久貴, 須佐見憲史, 畑田豊彦: 運動視差による「書き割り効果」の減少. 映像情報メディア学会誌, **56**, 1015–1019, 2002.
- 16) R. Kutka: Reconstruction of correct 3D perception on screens viewed at different distances. *IEEE Transactions on Communications*, **42**, 29–33, 1994.
- 17) 塩入 論: 知覚の恒常性 菊池 正 (編), 感覚知覚心理学, 朝倉書店, 140–167, 2008.
- 18) 塩入 論: 視覚における情報統合: 奥行き情報の統合. *Vision*, **13**, 223–227, 2001.
- 19) 塩入 論: 立体／奥行の知覚. *Vision*, **5**, 69–76, 1993.
- 20) 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.
- 21) 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**, 973–990, 1986.
- 22) H. H. Bulthoff and H. A. Mallot: Integration of depth modules: stereo and shading. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 1749–1758, 1988.
- 23) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion. *Vision Research*, **35**, 389–412, 1995.
- 24) K. Tsutsui, M. Taira and H. Sakata: Neural mechanisms of three-dimensional vision. *Neuroscience Research*, **51**, 221–229, 2005.
- 25) H. Ban, T. J. Preston, A. Meeson and A. E. Welchman: The integration of motion and disparity cues to depth in dorsal visual cortex. *Nature Neuroscience, Advance Online Publication*, 1–8, 2012.
- 26) E. B. Johnston, B. G. Cumming and M. S. Landy: Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, **34**, 2259–2275, 1994.
- 27) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: Integration of depth modules: stereopsis and texture. *Vision Research*, **33**, 813–826, 1993.
- 28) 坂野雄一, 金子寛彦, 松宮一道: 両眼視差と遠近法情報の統合過程における視距離と過去の経験の影響. 光学, **33**, 110–121, 2004.
- 29) 松原和也, 松宮一道, 塩入 論, 高橋修一, 石橋貴規, 大橋 功: 輝度コントラスト, 刺激偏心度の主観的奥行き量への影響, 信学技報, **109**, IE2009-191, 71–75, 2009.
- 30) K. Matsubara, K. Matsumiya, S. Shioiri, S. Takahashi, T. Ishibashi and I. Ohashi: The effect of luminance contrast and stimulus distance on the subjective depth. *Vision Supplement*, **22**, 76, 2010.
- 31) S. Takahishi, T. Ishikawa, Y. Hyodo, I. Ohashi, Y. Shimpuku, K. Matsubara and S. Shioiri: Control of subjective depth on 3D displays by a quantified monocular depth cue. *Journal of the Society for International Display*, **19**, 29–36, 2011.
- 32) 塩入 論: 視覚のボトムアップ処理—奥行運

- 動の知覚からの考察一. 基礎心理学研究, **22**, 94–101, 2003.
- 33) S. Shioiri, T. Nakajima, D. Kakehi and H. Yaguchi: Differences in temporal frequency tuning between the two binocular mechanisms for seeing motion in depth. *Journal of the Optical Society of America, A*, **25**, 1574–1585, 2008.