

## 視覚系による絶対距離情報を用いた奥行のスケーリング

中溝 幸夫

九州大学大学院 人間環境学研究所 心理学講座

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-19-1

下野 孝一

東京商船大学 商船学部 流通情報工学課程

〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6

### Depth Scaling by the Visual System with Absolute Distance Information: A Review

Sachio NAKAMIZO and Koichi SHIMONO

#### 1. はじめに

視覚系は、機能的側面から考えると、2つの下位系に大別される。一つは、事物が“どこにあるか”を視空間の中に定位する空間定位系であり、もう一つは、事物が“何であるか”を認知するパターン認知系である。空間定位系は、さらに距離系と方向系から構成されており、距離系は絶対距離と相対距離を、方向系は絶対方向と相対方向を処理する。距離系が処理する絶対距離とは、観察者から外界のある点（例えば、ある事物）までの空間間隔であり、エゴセントリック距離（egocentric distance）とも呼ばれている。相対距離とは、外界の2点間の空間間隔（例えば、事物と事物の距離）であり、エキゾセントリック距離（exocentric distance）あるいは、簡単に奥行（depth）と呼ばれている（本稿では奥行の語を用いる）。距離系は、これら2種類の距離情報を処理することによって、視空間の量的・質的な距離・奥行特性を出力している。

本論文は、視覚系による絶対距離情報を用いた奥行のスケーリング（depth scaling）を取り扱う。奥行スケーリングとは、ある奥行手がかりに基づいて知覚される奥行量を、絶対距離情報を用いて“換算する”ことをいう。奥行恒常性（depth constancy）として知られている現象は、奥行スケーリング機能の知覚的表現の1つである。われわれは、絶対距離情報を用いた奥行のスケーリングを視覚系の機能原理の1つであると考えており、この機能原理によって視覚系は両眼網膜像差や単眼運動視差が生み出す不良設定問題を解決し、外界の空間構造の“ベリディカルな（veridical）”復元を行っている。その証拠を提出した研究を概説することが本稿の主要な目的である。

[本稿ではベリディカルとは、知覚が“実在の物理的特性に一致する”つまり、知覚の“確度（accuracy）が高い”という意味で用いる。距離情報を用いたスケーリングという考えは、近代の哲学と科学にもっとも影響を与

えたフランスの哲学者ルネ・デカルト（1596-1650）による“大きさの恒常性”の理論に遡ることができる。彼は、事物の知覚された大きさと形とが、その事物までの距離知覚によって完全に決定されると明言した<sup>1)</sup>。奥行のスケーリングに関する研究は、これまでに Ono and Comerford (1977)<sup>2)</sup>, Howard and Rogers (1995)<sup>3)</sup>, Collett and Parker (1998)<sup>4)</sup> によっても概説されているので、それらも参照していただきたい。]

視覚系は、奥行を信号する情報（いわゆる、奥行手がかり）だけでは事物間の奥行き量に関するベリディカルな情報を出力することができない。例えば、奥行手がかりの1つである両眼網膜像差（binocular retinal disparity）だけでは、物理的奥行き量を一義的に特定できない。[以下、両眼網膜像差を簡単に網膜像差と表わす。さらに、網膜像差には水平網膜像差と垂直網膜像差が区別されており、それぞれが信号する情報は異なっているが、本稿では、断らない限り網膜像差は水平網膜像差のことを指す。]つまり、網膜像差だけから外界の物理的奥行き量を計算するという問題は、典型的な不良設定問題である。しかし、この不良設定問題は、視覚系が事物までの絶対距離および両眼距離（両眼の間隔）の情報を利用できさえすれば一つの「解」を得ることができる（2.1節を参照）。実際に、視覚系は、絶対距離情報を利用することによってさまざまな奥行手がかりから見かけの奥行をスケーリングし、不良設定問題の解を計算しているらしい。以下、その実験的証拠をいくつかの奥行手がかりについて示そう。[この種のスケーリングは、キャリブレーション（calibration）、リマッピング（remapping）など、さまざま名称で呼ばれているが<sup>5)</sup>、本稿ではスケーリングの用語を用いる。]

本稿が取り扱う数量的奥行手がかりは、両眼網膜像差と運動視差（motion parallax）であり、それぞれ2節、3節でとり扱う。それぞれの手がかりについての定義を述べた後、視

覚系による絶対距離情報を用いたスケーリングを示す実験的証拠について述べる。4節では、奥行のスケーリングの可能性を示す2つの運動奥行錯視を取り上げる。一つは回転立体視（stereokinetic effect）で、もう一つはプルフリッヒ奥行効果（Pulfrich stereoeffect）と呼ばれている現象である。われわれの観察によると、いずれの現象でも観察距離と知覚される奥行き量の間に関係が得られている。これらの現象がどんな手がかりにもとづいているかは論争中である（例えば、プルフリッヒ現象に関してはHoward and Rogers, 1995<sup>3)</sup>参照）。しかし、われわれは、回転立体視では運動視差の、プルフリッヒ現象では網膜像差の等価物（equivalent）が処理されており、視覚系は、それらが信号する奥行を絶対距離情報を用いてスケーリングしていると考えている。5節では奥行をスケーリングするために視覚系が用いている情報はなにかという問題を、6節ではスケーリングの神経生理学的証拠について検討する。

## 2. 網膜像差の逆自乗法則と奥行恒常性

### 2.1 網膜像差の幾何学

眼の高さの横断面上において、観察者の眼から異なる距離にある2点のもつ網膜像差は、それぞれの点が両眼に対してはる角度の差で近似できる[厳密には、それぞれの眼の節点 nodal point がそれぞれの点に対してはる角度の差である]。図1において、事物Aと事物Bの間の網膜像差はそれぞれの事物が両眼に対してはる角度 $\theta_1$ と $\theta_2$ の差で近似できる（図1a）。図1aにおいて、 $\theta_1$ と $\theta_2$ の差は、2つの事物がそれぞれの眼に対してはる角度 $\alpha$ と $\beta$ の和に等しい。つまり、 $\alpha$ と $\beta$ が一定である限り、2つの事物の間の網膜像差の大きさは常に一定である。ところで、図1bにおいて、 $\alpha$ と $\beta$ の大きさは図1aの場合と同一なので、2つの事物の間の網膜像差の大きさは、aの場合と同じである。しかし、図からわかるように、2つの事物間の奥行き量は異

なっている ( $d_1 \neq d_2$ )。したがって、視覚系が網膜像差の大きさだけから奥行量を計算しているとするならば、同じ大きさの網膜像差から無限個数の奥行量を計算することができる。このことは、網膜像差の情報だけでは2つの事物間(あるいは、奥行方向にある2点間)の奥行量を特定できないことを意味する。

では、どのようにすれば奥行量が特定できるのか? 原理的には、観察者から2つの事物のうちどちらかの事物までの距離(絶対距離)および両眼距離を特定することができれば、視覚系は奥行量を特定することができる。事物までの距離と両眼距離の特定が正確であれば、奥行量も正確に特定できる。距離(D)と奥行(d)と網膜像差( $\delta$ )との数学的關係は、 $d$ がDに比較してかなり小さい場合( $d \ll D$ )、次式で近似される(本式の導出については、Ono and Comerford, 1977<sup>2)</sup> 参照)。

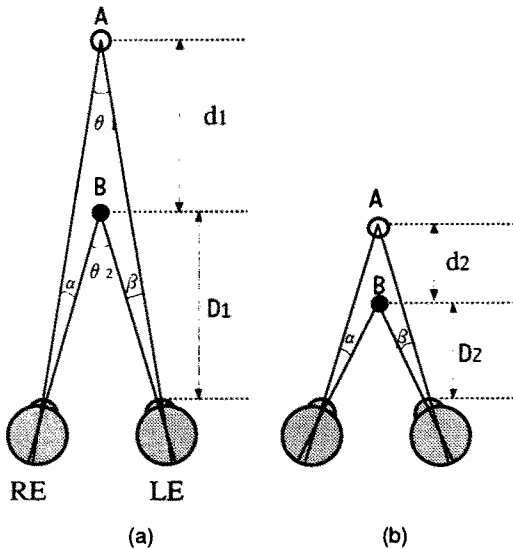


図1 外界の事物(A, B)と網膜像差、物理的奥行、絶対距離の關係。(a) (b)において、角 $\alpha$ と角 $\beta$ は、同じ大きさである。したがって、事物A, Bが生み出す網膜像差の大きさは等しい。しかし、物理的奥行量は異なる。つまり、網膜像差は、物理的奥行の“ペリディカルな”手がかりとはならない。ペリディカルな奥行を出力するためには、視覚系は絶対距離情報を必要とする。

$$\delta = \frac{ld}{D(D+d)} \cong \frac{ld}{D^2} \quad (\delta \text{ はラジアン単位}) \quad \dots (1)$$

( $\delta$ : 網膜像差,  $l$ : 両眼距離,  $d$ : 奥行,  $D$ : 絶対距離)

(1)式は、網膜像差の逆自乗法則 (Inverse Law of Disparity) と呼ばれており、網膜像差が両眼距離と奥行に比例し、距離の自乗に反比例することを意味している。(1)式を奥行 $d$ で解くと、(2)式で表されるように、奥行は、網膜像差に比例し、距離の自乗に比例し、両眼距離に反比例する。もし視覚系がこの式に一致するようにそれぞれのパラメータを処理して、奥行知覚を出力すると“仮定する”ならば、知覚された奥行の測定値は、3種のパラメータの関数となるはずである。

$$d \cong \frac{\delta \times D^2}{l} \quad \dots (2)$$

視覚系があたかも(2)式を“知っている”かのようにふるまうことは、奥行恒常性 (depth constancy) として知られている<sup>24)</sup>。奥行恒常性とは、一定の物理的奥行量は、観察者からの距離いかににかかわらず、一定の奥行量として知覚される現象である。奥行恒常性は、日常的には次のような知覚現象に現れる。例えば、顔面から奥行方向に置かれた、ある長さをもった対象(例えば10 cmの鉛筆)は、顔の近くであろうが、遠くであろうが、ほぼその長さ(10 cmの長さ)に知覚される。

このように、奥行恒常性が成立するということは、奥行量の知覚が正確であることを意味する。奥行量が正確に知覚されるということは、同時に、視覚系が網膜像差の情報だけではなく、絶対距離と両眼距離の情報を正確に処理していることを意味する。つまり、奥行恒常性が成立するためには、視覚系は、網膜像差を絶対距離情報にもとづいて“スケールリング”を行い奥行を出力しているはずだ、ということになる。

われわれが授業で行なっている奥行恒常性または逆自乗法則の簡単なデモンストレーションは、アナグリフによるステレオグラム

を使う方法である。赤色と緑色でプリントされたランダムドットステレオグラムを片手で持って眼から 25 cm 程度の距離で観察する。(もう一方の手で赤色と緑色のフィルターを眼の前に置く。) 次に腕を伸ばして距離を約 2 倍の 50 cm にしたとき、ステレオグラム面から飛び出して(引っ込んで) いるように見える奥行の量がほぼ 2 倍に増加することがわかる。これは、奥行恒常性を示す簡単な事実の一つである。ステレオグラムまでの距離を 2 倍にすると、網膜像差は 2 分の 1 に減少する。(2) 式にもとづけば、距離が 2 倍になり、網膜像差が 2 分の 1 に減少すると、奥行量は 2 倍になると予測される(両眼距離は一定)。

また、双眼鏡で外界の既知の対象を見た時に、その奥行が平板に見える現象も奥行恒常性機構の働きと関係づけて説明できる<sup>3,5)</sup>。まず、双眼鏡の光学的機能によって事物の網膜像が拡大される。既知の対象の像が拡大されるので、既知の対象は近づいたように見えるだろう。“実際に” 事物までの距離が減少したとしたら、網膜像差の大きさは距離の“自乗” に比例して大きくなるはずである。しかし、双眼鏡による像の拡大は線形なので、網膜像差の大きさも線形にしか増加しない。(2) 式によれば、距離の減少ほど網膜像差が増加しない場合、視覚系は奥行を減少して出力することが予測される。視覚系は、あたかも現実と双眼鏡の場合とのギャップを埋めるかのよう、事物の奥行を“縮める”のである。つまり、双眼鏡による視覚の変化は、奥行恒常性の機構が働いた結果だというわけであ

る。

## 2.2 網膜像差にもとづく奥行恒常性の実験的証拠

両眼網膜像差と観察距離をパラメータにして、知覚された奥行量を調べた心理物理実験の結果について検討してみよう。これらの研究は、いずれも知覚された奥行量と逆自乗法則にもとづく理論的予測値(以下、理論値)とを比較している。一般的に言えば、一定範囲の観察距離や網膜像差において観察値と理論値とは比較的よく一致しているといえる。この点で、奥行恒常性は、“大きさの恒常性”とよく似ているのである。大きさの恒常性も一定の観察条件下でのみ得られる現象である(例えば、Holway and Boring, 1947<sup>6)</sup>)。

これまでにさまざまな研究<sup>7,21)</sup>が行われ、それらは、用いた反応尺度、調べた距離の範囲、刺激の網膜像差の大きさ、距離手がかりの種類が異なっている(表1参照)(表1には1977年以降の主な研究だけを示している。1976年以前の研究については Ono and Comerford, 1977<sup>2)</sup>を参照。)

それらの研究の中で、2つの研究をとりあげよう。一つは、ランダムドットステレオグラムを用いて 0.5 m から 4 m の観察距離までの知覚された奥行量を測定した Shimono and Nakamizo (1990)<sup>19)</sup>の研究で、もう一つは、日常環境において実際の物体を用いて 0.5 m から 24 m の観察距離までの知覚された奥行量を測定した Ikeda and Nakamizo (1999)<sup>15)</sup>の研究である。前者の研究では、奥行の手がかりが網膜像差に限定されており、刺激も人工的なものだが、後者の研究ではほとんどすべての奥行手がかりが利用可能ないわゆる豊富な手

表1: Summary of the depth constancy experiments.

Author (year)	Size of Disparity	Duration	Stimulus	Viewing distance(cm)	Measuring method
Ikeda & Nakamizo (1999)	1', 2', 4', 8'	free	real (verical bar)	50-2400	reproduction & blind walking
Glennester et al. (1996)	4'~12.8'	free	stereoscopic	38-228	depth matching
Tittle et al. (1995)	6'~27'	free	stereoscopic	70-170	adjustment of stimulus shape
Durgin et al. (1995)	10.5'~54.9'	free	real (wooden cone)	100-300	rate judgement of depth to base
Johnston (1991)	4.7'~13.5'	1.5 s	stereoscopic	53.5-214	shape judgement
Shimono et al. (1990)	12'	free	stereoscopic/real	50-400	reproduction
Collett et al. (1991)	3'~83'	3-4 s	stereoscopic(anaglyph)	45-130	probe adjustment
Cormack (1984)	4.5', 16.3'	free	after image	5m~6km	depth probe matching/verbal
Ritter (1979)	20' (crossed only)	100 ms	stereoscopic	60-180	depth probe
Ritter (1977)	4'	free	stereoscopic	90-180	reproduction

がかり (full cues condition) 条件である。両研究とも、明室条件下で行われたので、絶対距離手がかりは豊富に存在していた(したがって、絶対距離知覚はペリディカルであった)と仮定することができる(例えば、Sedgwick, 1986<sup>23)</sup>や東山, 1994<sup>40)</sup>)。

Shimono and Nakamizo (1990)<sup>19)</sup>の実験結果が図2に示されている。図2は、それぞれの観察距離における3種の大きさの網膜像差をもつ刺激のそれぞれについて、8名の観察者の知覚した奥行量の平均値を観察距離の関数としてプロットしたものである。実線は逆自乗法則にもとづく奥行量の予測値を表す。図から明らかなように、知覚された奥行量の平均値は、予測値に比較的良好に一致している。平均値と標準偏差から99%信頼限界を計算すると、すべての観察距離条件で、信頼限界範囲に理論値が含まれていた。これらの結果は、実験で用いた6'-18'の範囲の網膜像差お

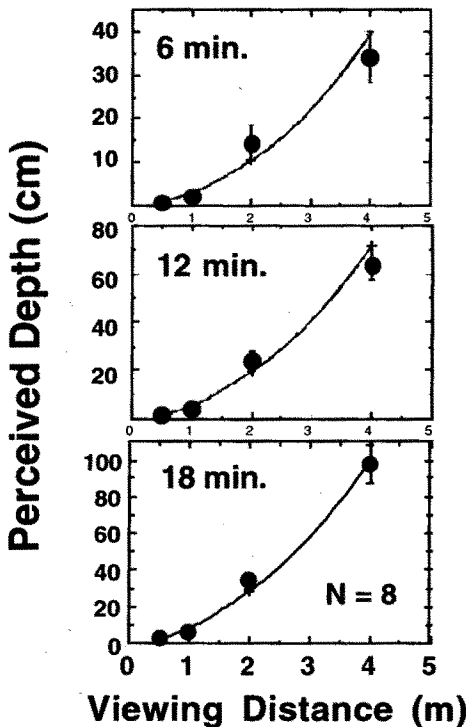


図2 両眼網膜像差にもとづく奥行恒常性を調べた実験結果 (Shimono & Nakamizo, 1990) (説明本文)。

よび4 mまでの観察距離について、明室条件下においては、視覚系は絶対距離情報を用いて奥行量をスケールしていることを示している。

一方、Ikeda and Nakamizo (1999)<sup>15)</sup>の研究では、実物体を刺激にした日常観察条件においては、網膜像差が小さければ24 mの観察距離まで奥行恒常性が成り立つことが示された。この実験は、距離幅2 m、長さ30 mの廊下を使って実験が行われた。刺激は直径2 cm、長さ1.6 mの棒で、廊下の一方の端の壁を背景にして垂直に立てられた。壁には、線分幅2 mm、線分間隔5 cmの格子パターン(縦2 m×横1 m)が刺激の背景野として描かれていた。観察距離は、1, 2, 4, 8, 16, 24 mの6水準であった。被験者は、直立の姿勢で刺激と背景を観察し、両者の奥行量を2種類の方法のどちらかを用いて再生した。1つは、見かけの奥行量とテープの長さが等しくなるようにテープの長さを調整する方法で、知覚された奥行量が比較的小さい場合(約1.5 m以下)に用いられた。もう1つは、知覚された奥行を閉眼歩行距離で再生する方法(以下、閉眼歩行法(blind walking measure))であり、知覚された奥行が比較的大きい場合(約1.5 m以上)に用いられた(閉眼歩行法の確度については、Loomis et al. (1992)<sup>25)</sup>参照)。刺激と背景との間の網膜像差の大きさは、1', 2', 4', 8'の4水準であり、これらの網膜像差によってシミュレートされた物理的奥行量は3.5 cm(1 mの観察距離で網膜像差8')から約11.18 m(24 mの観察距離で網膜像差8')の範囲にあった。図3には、13名の被験者の知覚された奥行量の平均値が観察距離の関数としてプロットされている。図から網膜像差1'と2'では、ほぼ24 mの観察距離まで平均値は理論値(逆自乗法則の予測)にほぼ一致しているが、網膜像差4'と8'では、16 m以上の観察距離になると平均値が理論値から逸脱しており、むしろ、知覚された奥行量の過小評価が起ったことがわかる。

以上に述べた2つの研究結果、および表1に示された従来の実験結果を総合的に判断すると、全体的傾向として、「刺激までの観察距離、および刺激の網膜像差の一定範囲において、奥行恒常性は成立する。つまり、視覚系は一定範囲の観察距離において、絶対距離情報にもとづいて網膜像差によって生み出される奥行をスケールアップしている。しかし、観察距離および網膜像差が一定範囲を超えると、奥行恒常性からの逸脱が起り、その範囲は実験条件に依存する。」と結論することができる。

### 2.3 網膜像差勾配と奥行恒常性

網膜像差の連続的な変化は、網膜像差勾配 (disparity gradient) と呼ばれており、奥行面の傾斜や事物の3D形態の知覚の手がかりとなる。この節では、網膜像差勾配によってシミュレートされた物体の表面や形の知覚と距離情報との関係を調べた研究について検討する。

#### 2.3.1 網膜像差、網膜像差勾配、網膜像差曲率と距離との関係

網膜像差勾配とは、視角単位で表わされた空間内の2点間の網膜像差の大きさ ( $\delta/\theta$ ) のことである ( $\theta$ は2点のはる視角)。

(2)式が示すように、網膜像差は、眼から外界のある点(2点のうちどちらか)までの距離(D)が2倍になると、ほぼ4分の1になる。つまり、距離の自乗に反比例する。しかし、それら2点のはる視角は距離が2倍になれば、2分の1になるので、網膜像差勾配は距離が2倍になれば、ほぼ2分の1になる。つまり、網膜像差勾配は観察距離(の自乗ではなくて)に反比例する<sup>3,24)</sup>。

一方、網膜像差曲率 (disparity curvature) とは、視角単位で表わされた2つの網膜像差勾配の差のことをいう。上で述べたように、距離が2倍になれば2つの網膜像差勾配はそれぞれ2分の1になる。しかし、これら2つの網膜像差勾配のはる視角もまた距離が2倍になれば、2分の1になるので、網膜像差曲率は距離が2倍になってもほぼ一定である。こ

のことは、網膜像差曲率によってシミュレートされた形あるいは面の知覚は、距離が変化してもほぼ一定であることを意味する<sup>3,24)</sup>。

もし視覚系が網膜像差曲率を処理することによって奥行面もしくは3D形態を知覚しているとすれば、観察距離の変化にもかかわらず、それらは一定になるはずである(網膜像差曲率仮説)。実験結果は、この予測に一致するだろうか?

#### 2.3.2 網膜像差勾配にもとづく形の知覚と観察距離との関係

Johnston (1991)<sup>14)</sup> は、網膜像差勾配のみによってシミュレートされた事物の形態が観察距離によっては不正確になるという事実を見出した。彼は、ランダムドットパターンからなる5種類の奥行をもつ(網膜像差4.7'-13.5')凸形の円筒面をランダムな順序で被験者に提示した。被験者の課題は、ランダムドット面の奥行が半円筒面(奥行が円筒の直径の1/2)に比べて、浅いか、深いかを決定することであった。この課題が53, 107, 214 cmの観察距離で行われた。その結果、ほぼ1 mの中間距離では奥行知覚はほぼ正しかったが、近距離(約0.5 m)では過大に、遠距離(約2.0 m)では過小に判断された。Johnston (1991)<sup>14)</sup> は、近距離と遠距離における円筒形

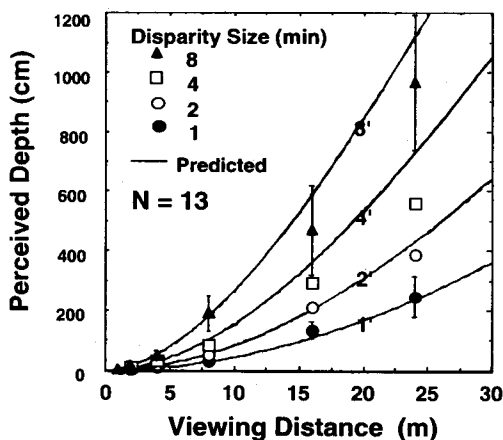


図3 日常観察条件下での奥行恒常性を調べた実験結果 (Ikeda & Nakamizo, 1999)。網膜像差1'および8'についてのみ標準偏差(垂直線分)が描かれている(説明本文)。

のゆがみが不正確な絶対距離知覚に起因すると解釈し、この結果は網膜像差曲率仮説では説明できないと結論した。その後、Tittle et al., (1995)<sup>21)</sup>も 70-170 cm の観察距離で網膜像差だけでシミュレートされた水平方向の円筒を提示して、被験者に円筒の形態を調整させる課題を与えた結果、3Dの形態知覚が観察距離の増加にともないゆがむという結果を報告した。

一方、次に述べる2つの研究では、ほぼ完全な奥行恒常性が得られている。一つは、網膜像差によってシミュレートされた凹凸面の刺激を用いた研究<sup>12,13)</sup>で、もう一つは実際の事物を用いた研究<sup>9)</sup>である。

Glennester, Rogers and Bradshaw (1994)<sup>12)</sup> (1996)<sup>13)</sup>は、被験者の課題による奥行恒常性の達成度の違いを示した研究で、絶対距離の手がかりが豊富な実験環境においては、奥行マッチング課題ではほぼ100%の完全な奥行恒常性が得られたことを報告した。彼らは、ランダムドットからなる水平の正弦波、矩形波形をした凹凸面を水平網膜像差によってシミュレートし、異なる2つの観察距離(57 cmの距離と38 cm-228 cmまでのどれか1つの基準距離の間)で凹凸面の奥行をマッチングさせた。その結果、データはほぼ完全な奥行恒常性を示した。Durgin, Proffitt, Olson and Reinke (1995)<sup>9)</sup>らも実物の立体を日常環境に近い条件下で提示して、ほぼ完全な奥行恒常性を示す結果を得ている。彼らは、5 cm-20 cm(網膜像差10.5'-54.9')までの奥行をもつ円錐形のコーンを、1 m-3 mまでの観察距離に提示して、被験者にコーンの底辺の長さ(10 cm)に対する奥行の比を判断させた。その結果、ほぼ完全な奥行恒常性を得た。この結果は、物体の形態知覚がペリディカルであることを意味している。彼らは、構造化された明室環境のもとでは正確な絶対距離知覚にもとづいて、網膜像差勾配のみによって正確な奥行知覚が得られると結論した。

結論として、網膜像差勾配にもとづく物体の形の知覚は、距離情報が豊富な環境ではほ

ぼ一定になり、正確であるといえるだろう<sup>3)</sup>。しかし、距離情報が乏しい環境(例えば、ランダムドットパターンによる網膜像差のみによるシミュレーション環境)では完全な奥行恒常性からの逸脱が起る。

### 3. 運動視差の逆自乗法則と奥行恒常性

#### 3.1 運動視差の幾何学

運動視差と網膜像差の本質の違いは2点ある。1つは、運動視差は単眼性情報である(単眼運動視差とも呼ばれている)が、網膜像差は両眼性情報であること、第2に、運動視差は動的であるが、網膜像差は静的であることである。しかし、両眼の位置に相当する距離を、単眼が移動すると考えれば、単眼運動視差と両眼網膜像差とは数学的に等価であるとみなしうる。この考え方にもとづいて量的に表現された運動視差を等価網膜像差と呼ぶ<sup>26-28)</sup>。[運動視差にもとづく立体視を単眼立体視、両眼網膜像差にもとづく立体視を両眼立体視と呼ぶこともある。それぞれの立体視の特性の違いについては、近江(2000)<sup>31)</sup>参照。]

(1)式にならって、運動視差を数学的に表現してみよう(本式の導出については、中溝・斎田, 1990<sup>27)</sup>, Ono et al., 1986<sup>30)</sup>, 近江, 2000<sup>31)</sup>などを参照)。

$$\Omega = \frac{Md}{D(D+d)} \cong \frac{Md}{D^2} \quad (\Omega \text{はラジアン}) \quad \text{---- (3)}$$

( $\Omega$ : 運動視差, M: 頭部運動量, D: 絶対距離, d: 奥行,  $d \ll D$ )

網膜像差の場合と同様に、運動視差に基づいて知覚される奥行の恒常性が成立するかどうか、という問題は、異なる観察距離において、(3)式にもとづいて予測される奥行量と知覚される奥行量を比較すればよい。

#### 3.2 運動視差にもとづく奥行恒常性の実験的証拠

B. Julesz (1960)<sup>29)</sup>によるランダムドットステレオグラムの発明によって、図形の形態的特性に“汚染”されない、“純粋な”網膜像差

を提示することができるようになった〔従来のステレオグラムでは、それぞれの眼に提示される単眼刺激の中に、すでに図形の形態的特性が知覚されるが、ランダムドットステレオグラムでは単眼刺激のみでは図形の形態的特性は知覚されず、両眼の情報が統合された後にはじめて形態的特性が知覚される〕。その結果、視覚系の網膜像差処理特性を調べることができるようになった。同様に、“純粹な”運動視差は、図4に示す方法によって提示することができる<sup>27,28,31)</sup>。ディスプレイには、ランダムドットパターンが提示される。観察者の頭部が静止しているとき、ランダムドットも静止している(図4a)。しかし、観察者の頭部が動くと、それに連動してランダムドットが、あらかじめ設定された量だけ運動する。(図4bの場合は、ランダムドット面が正弦波状に変調されている。このように、ディスプレイ面上での速度勾配をもつ刺激パターンは、運動視差勾配あるいはオプティックフローoptic flowと呼ばれている。)この時、観察者は、図4cに示されたような3D形状(奥行をもつ事物)を知覚することができる。〔観察者が頭部を静止した状態でも図4bに示されたランダムドットの運動を観察すると、3D形状が知覚される。これは、“運動からの形(shape from motion)”とか“運動奥行効果(kinetic depth effect)”と呼

ばれている。この場合、一般的には、知覚される奥行の方向は曖昧になり、凸面か凹面かのどちらかが知覚的に交代する。近江(2000)<sup>31)</sup>は、これを対象運動視差として観察者運動視差から区別している。]

運動視差にもとづく知覚された奥行の恒常性を調べた最初の研究は、Ono, Rivest and Ono(1986)<sup>30)</sup>である。彼等はCRT画面上にランダムドットを提示し、観察距離を40, 80, 160, 320 cmに変化させて、知覚された奥行量を被験者に再生させた。その結果0.8 mまでは(3)式の予測に一致した奥行量が観察されたが、それ以上の観察距離では知覚された奥行量は、理論値よりも過小評価された。しかし彼らの実験では、観察距離の変化とディスプレイの網膜サイズやドット密度、運動視差勾配が共変しているという難点がある。これらの難点を取り除いて、この問題を再検討したのが斎田・中溝(1987)<sup>26)</sup>の研究である。

斎田・中溝(1987)<sup>26)</sup>の研究によると、運動視差が大きくなければ(約30')少なくとも4 mの観察距離まで奥行恒常性が保持されることを示した。彼らの結果が図5に示されている。図5は、16名の被験者の知覚された奥行量の平均値を観察距離の関数として運動視差量の条件別にプロットしたものである。図の中の直線は、運動視差の逆自乗法則にもとづく理論的予測値を表す。〔理論値が直線で

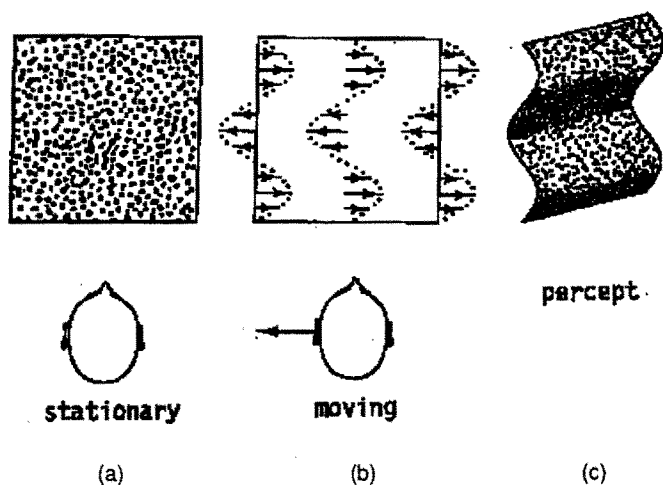


図4 “純粹な”運動視差を提示する方法(Rogers and Graham, 1979)。頭部が固定されているときは、ランダムドットパターンしか見えない(a)。頭部が運動すると、それに連動して正弦波状に変調されたドットの速度勾配が提示される(b)。その時に、知覚される立体像(c)。



ある理由は、彼等の実験においては、観察距離の増加にともなって刺激の運動視差量（等価網膜像差量）を線形に減少させたからである。] 実験の結果、等価網膜像差が比較的小さい（1.8' -28.8'）場合（small, medium 条件）、運動視差にもとづく知覚された奥行量は、4 m の観察距離までは (3) 式の前測にはほぼ一致することがわかった。しかし、等価網膜像差が比較的大きい（7.2-57.6'）場合（Large 条件）、知覚された奥行量は、予測値よりも過小に評価されていた。知覚された奥行量の平均値と標準偏差から 99% 信頼限界を計算した結果、small と medium 条件では 99% 信頼限界に平均値が含まれていた。一方、Large 条件では、50 cm の観察距離を除くと、1 m から 4 m までのすべての観察距離条件において、理論的前測値は、99% 信頼限界よりも高かった。この結果は、運動視差が大きい場合、1 m を越えると奥行のスケージングが完全ではないことを意味している。

最近、大塚・氏家・斎田 (1999)<sup>61)</sup> は、運動視差による奥行スケージングが知覚された距離にもとづくかどうかを 80-240 cm の観察距離範囲で検討した。その結果、観察距離の増加にともなって知覚された奥行量は増加したが、完全な奥行恒常性からは逸脱していた。80 cm の観察距離では逆自乗法則にもとづく奥

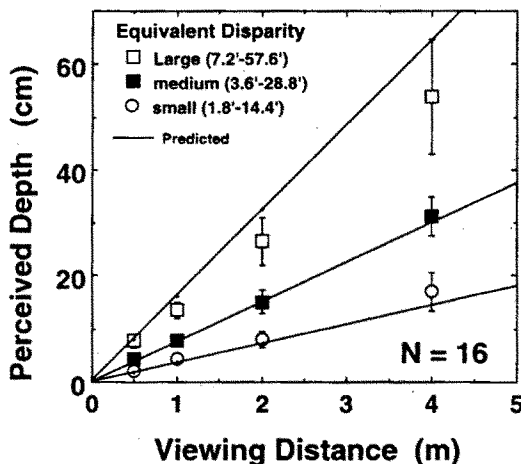


図5 運動視差にもとづく奥行恒常性の実験結果—奥行再生法を使用（斎田・中溝，1987）。

行の前測値より過大視が起り、240 cm の観察距離では過小視が起った。これらの理由はいまだ明らかではないが、彼らの結果は、スケージング原理に矛盾するわけではない。

#### 4. 奥行のスケージングを示唆するその他の現象 4.1 回転立体視の知覚された奥行に及ぼす観察距離の効果

ある種の 2D 図形は、回転運動することによって奥行感が増加する。Musatti, C. L. (1924)<sup>32)</sup> は、この現象を回転立体効果（stereokinetic effect）と名付けた（Zanforlin, 1988<sup>33)</sup> より引用）。回転立体効果を生む図形の一例が図 6 に示されている。この図形のもっとも外側の円の中心を軸にして約 22 回転/分の速度で回転運動させ、片眼で観察すると、図形面から手前に飛び出した円錐形の立体、あるいは内側に縞模様のある円筒形の立体に見える（この他にも回転立体効果を生むいろいろな図形が報告されている<sup>34)</sup>）。

Nakamizo, Kondo and Shimono (1994)<sup>35)</sup> の研究によると、回転立体効果は、一定の観察距離範囲においては、観察距離の増加にともなって増加することがわかった。彼らは、図 6 に示す図形を用いて、回転立体効果の知覚された奥行量を観察距離の関数として測定した。直径 10.5 cm の 3 種類の円盤（偏心距離：



図6 回転立体視効果と観察距離との関係を調べるために用いた刺激（Nakamizo, Kondo, & Shimono, 1994）。

0.5, 0.9, 2.7 cm) が, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 m のそれぞれの観察距離の前額平行面上に提示され, 円盤は 22.5 rev/min の速度で回転した. それぞれの下位条件に異なる 5 名の被験者 (合計 40 名) がランダムに割り当てられた. 実験結果が図 7 に示されている. 図 7 は, それぞれの下位条件における 5 名の被験者が知覚した奥行量の平均値を偏心度別に観察距離の関数としてプロットしたものである. 結果は, 観察距離の増加にともなって知覚された奥行量も増加したことを示している. この事実は, 回転立体視効果が絶対距離情報によってスケールアップされていることを示唆している. というのは, まず回転立体視効果の原因が何であれ, 観察距離の増加にともなって, 知覚された奥行量は増加しているからである.

Nakamizo, Kondo and Shimono (1994)<sup>35)</sup>, Nakamizo and Kondo (1995)<sup>36)</sup> らは, これらの結果を説明するために, “運動視差仮説” を提唱した. この仮説によれば, 視覚系は回転運動する刺激が生み出す運動視差を絶対距離情報を用いてスケールアップすることによって, 奥行量を出力している. したがって, 奥行量は, 運動視差の実験結果と同様に, 絶対距離の増加にともなって増加するのである.

#### 4.2 プルフリッヒ奥行効果と観察距離

プルフリッヒ奥行効果 (Pulfrich stereophenomenon) とは, 前額平行面を左右に動く振り子 (正弦波運動) を一方の眼が ND フィルターを通して両眼で観察すると, 振り子が奥行方向に膨らんだ楕円軌道上を回転運動しているように見える現象である. この運動—奥行錯視は, 一般に, 両眼潜時差—空間的網膜像差仮説 (visual-latency spatial-disparity hypothesis, 以下, 潜時仮説とよぶ) によって説明されてきた<sup>3)</sup>. この仮説によれば, フィルターを通して観察する方の眼が受け取る光の強度が弱められ, その結果, 眼から脳への信号の伝達時間に両眼間で差が生じ, この時間差が空間差, つまり等価網膜像差に変換されるために奥行が生じると説明されている

(例えば, Howard and Rogers, 1995<sup>3)</sup>).

図 8 は, 潜時仮説を示している. 振り子 P は, 観察者の眼から D cm の前額平行面上の軌道を左右に正弦波状に運動している. 両眼は, F 点を注視しており, 右眼は ND フィルターを通して振り子を観察している. 振り子が今, 左から右に動いているとしよう. 右眼の信号は, 左眼にくらべて常に遅れて脳に到達するので, 左眼が振り子を A 点の位置に見ているとき, 右眼は A 点の左側 A' の位置に振り子を見ることになる. これは, 振り子が交差性網膜像差を生む場合と同じである. 一方, 振り子が右から左へ動いている場合について考えてみよう. 今度は逆に左眼が B 点の位置に振り子を見ているとき, 右眼は B 点の右側, B' の位置に振り子を見ることになる. これは, 振り子が非交差性網膜像差を生む場合と同じである. この観察条件下で, 観察距離 D を変えるとどんなことが生じるだろうか? もしフィルターによる両眼の時間差が等価網膜像差に変換され, 視覚系は等価網膜像差を奥行に変換しているとするなら, 観察距離の増加にともなって知覚される奥行量も増加するはずである. この予測は, Wallach, Gillam and Cardillo (1979)<sup>22)</sup> と Nakamizo and Chen (2000)<sup>38)</sup> によって確かめられた. 前者の

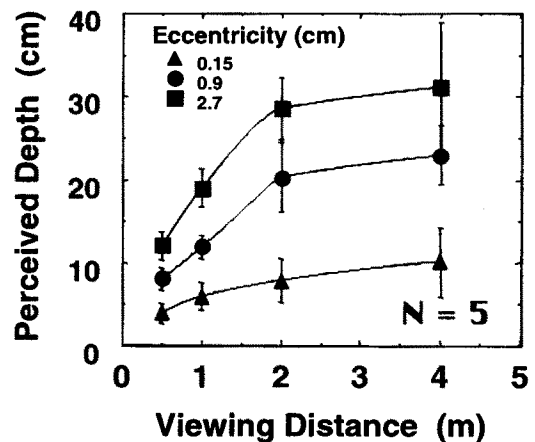


図 7 回転立体視効果における観察距離の関数としての知覚された奥行量. 垂直線は標準偏差を表す. (Nakamizo, Kondo, & Shimono, 1994).

研究では、1.5 mの観察距離、後者の研究では4 mの観察距離まで奥行恒常性が確認された。

Nakamizo and Chen (2000)<sup>38)</sup>は、プルフリッヒ奥行効果における知覚された奥行量と観察距離との関係を調べた。刺激は、縦4.5 cm × 横0.5 cmの垂直の棒（垂直線分）で、モニターテレビの画面上、22.5 cmの水平距離を左右に振り子（正弦波）状に運動した。刺激棒の輝度は、平均57.7 cd/m<sup>2</sup>、背景の輝度は、平均29.8 cd/m<sup>2</sup>であった。独立変数は、刺激の運動速度（0.2, 0.4, 0.6 Hz）と観察距離（1, 2, 3, 4 m）であった。被験者は、左眼の前に置かれた1.0 ODのフィルター（Kodak wratten filter）を通して運動する刺激を観察し、知覚された奥行量を評定した。2種類の反応測度が用いられた。(a) マッチング課題：刺激の運動軌道の中央部において、刺激の知覚された奥行（画面からの知覚された距離）と画面からプローブの先端までの知覚された奥行を一致させる課題。(b) 奥行再生課題：刺激の知覚された奥行をテープの長さで再生する課題であった。

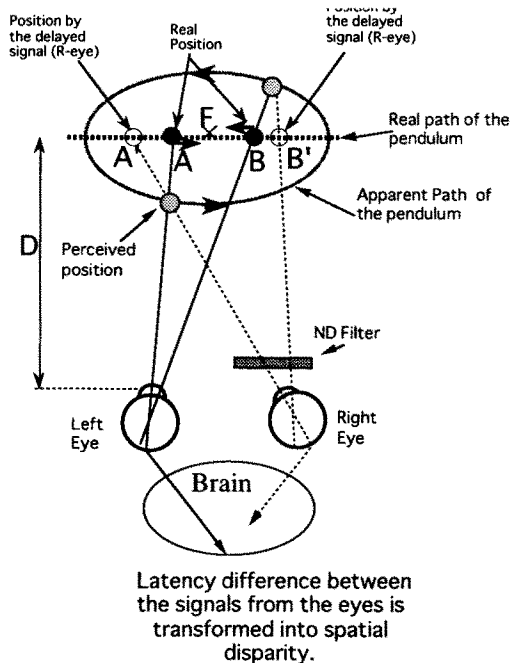


図8 Pulfrich 奥行効果を説明する概略図（中溝・陳, 1998<sup>37)</sup>）（説明本文）。

実験の結果が、図9に示されている。図9は、マッチング課題において、観察距離の関数としてプロットされた8名の被験者の知覚された奥行の平均値である。これらの結果から、次のことがわかった。(a) どちらの課題でも、すべての速度条件において、平均奥行量は観察距離の単調増加関数であった。(b) マッチング課題の結果では、すべての速度条件において、知覚された奥行の平均値は、網膜像差の逆自乗法則にもとづく予測値によく一致した。それぞれの観察距離で得られた奥行量の平均値（3種類の速度条件の結果を平均）の比率を算出した。1 mでの測定値を1.0とすると、2, 3, 4 mの順に、2.12, 3.08, 4.08となり、ほぼ完全な奥行恒常性が成り立っていることがわかる。(c) 奥行再生課題では、速度の遅い条件（0.2 Hz）においてのみ、逆自乗法則にもとづく予測値に平均値が一致した（速い条件（0.4, 0.6 Hz）では、予測値より過小評価された）。この結果は、プルフリッヒ奥行効果においても等価網膜像差が絶対距離情報を用いることによってスケールアップされていることを示唆している。

## 5. 奥行のスケールアップにはどんな絶対距離情報が使われているか？

本節では、視覚系が奥行のスケールアップを

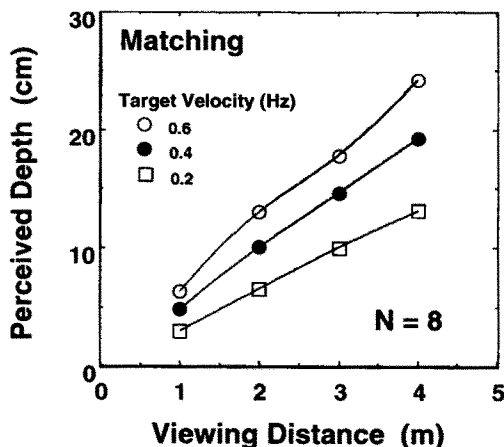


図9 Pulfrich奥行効果における観察距離の関数としての知覚された奥行量—マッチング課題（中溝・陳, 1998<sup>37)</sup>）。

行うためにどのような絶対距離情報を用いているかについて検討する。これまでの研究結果から、スケーリングのために用いられる可能性のある絶対距離情報（距離手がかり）は、次の3つである。(a) 網膜手がかり (retinal cues), (b) 網膜外手がかり (extraretinal cues), (c) 認知的手がかり (cognitive cues) である。網膜手がかりについては、垂直網膜像差（あるいは、differential perspective）を、網膜外手がかりには輻輳と調節を、認知的手がかりには、熟知した対象の大きさ (familiar size cue) を取り上げる。

奥行恒常性に関する研究の実験環境は、研究によってひじょうに異なっている（表1参照）、それらの研究において視覚系が用いたと推定される“絶対距離情報”もおそらく異なっており、それが異なる実験結果に反映されたと考えられる。この節では、主に、上で述べた手がかりと両眼網膜像差や運動視差にもとづいて知覚された奥行き量との関係を調べた研究に限定して概説する。〔視距離知覚一般に関しては、Foley, 1985<sup>39)</sup>; 東山, 1994<sup>40)</sup>; 近藤・中溝, 2000<sup>41)</sup>; Sedgwick, 1986<sup>23)</sup>などを参照。視距離知覚の確度と精度は、測定法、刺激が提示された観察距離、教示や観察態度、単眼視-両眼視などの諸要因によって影響され、観察距離の増加にもなって個人差も大きくなることがわかっている。一般的には、距離手がかりの豊富な日常空間 (full cue condition) においては、視距離知覚は“ペリディカル”である（例えば、Gilinsky, 1989<sup>41)</sup>; Higashiyama and Shimono, 1994<sup>43)</sup>。〕

### 5.1 垂直網膜像差

顔から一定距離の前額平行面上の2Dパターンは、水平および垂直網膜像差勾配を生む。この網膜像差勾配は、網膜の偏心率 (eccentricity) および眼から前額平行面までの距離の関数として表現できる<sup>44,47)</sup>。この事実は、視覚システムがこの種の情報を用いて奥行の尺度変換を行なっている可能性を示唆し

ている。この考えの延長線上で、Bishop (1989)<sup>48)</sup>は、奥行恒常性の成立が垂直網膜像差の正しい検出によるという仮説を提唱した。

この考えを支持する証拠が最近の研究によって提出された。Rogers and Bradshaw (1993)<sup>47)</sup>は、 $80^{\circ} \times 70^{\circ}$ の大画面ディスプレイを用いて、水平、垂直網膜像差勾配が奥行き量の判断におよぼす効果を調べた。刺激の奥行は水平網膜像差によってシミュレートされた正弦波状の奥行凹凸面で、被験者は眼から28cmと無限大の距離のどちらかに設定された網膜像差勾配下で知覚された奥行き量を報告した。その結果、2つの距離条件における判断された奥行き量の比は、1.0対1.7であった。この事実は、視覚システムが水平、垂直網膜像差勾配の情報を用いて奥行をスケーリングしていることを示唆している。

その後、Rogers and Bradshaw (1995)<sup>49)</sup>は、観察者から28.5cm-228cmまでの距離、および無限大の距離の前額平行面（大きさ $80^{\circ} \times 80^{\circ}$ ）を垂直網膜像差を使ってシミュレートして、それぞれの距離条件で面までの見かけの距離を6名の被験者に口頭報告で評定させた（刺激面までの実際の距離は57cm）。それぞれの被験者の評定値をz得点で正規化し、その平均値を距離値に変換した結果、シミュレートされた距離と知覚距離とはほぼ線形関係にあった。この事実は、垂直網膜像差が直接、距離知覚に影響していることを意味している。しかし、彼らはディスプレイが小さい場合は（例えば、視角 $20^{\circ}$ 以下）、垂直網膜像差より輻輳のほうが効果があるとも述べている。これらの事実から、刺激のサイズが大きい条件 ( $>80^{\circ}$ ) では、垂直網膜像差の信号を用いてスケーリングが行われている可能性が高いと考えられる。

### 5.2 輻輳・調節

輻輳・調節と絶対距離知覚との関係に関する研究には、歴史的な経緯がある<sup>3,4,40,43,50,51)</sup>。一般的には、輻輳にもとづく距離判断は、個人差が大きいけれども、比較的近距离 ( $<2$ m)

においては正確であると言われてきた<sup>39, 50)</sup>。一方、奥行のスケーリングに関して、視覚系が輻輳・調節の情報を利用しているかどうかという問題に関しては、ネガティブな見解とポジティブな見解がある。

Gonzalez, Rivadulia, Perez and Cadarso (1998)<sup>52)</sup>は、輻輳と調節が網膜像差にもとづく奥行のスケーリングには関係ないと主張している。彼等は、ランダムドットステレオグラムを刺激として用い、3つの観察条件で知覚された奥行量を測定した。第1の条件は、刺激の物理的サイズ一定で、観察距離を変化させた(30-130 cm)。第2の条件は、刺激の網膜像サイズ一定で、観察距離を変化させた。第3の条件は、刺激の物理的サイズ一定で、プリズムによって輻輳を一定に(視軸を平行位に)保ちながら、観察距離を変化させた。それぞれの条件で、知覚された奥行量を測定した結果、第1と第3の条件では、知覚された奥行量は単調増加し、第2の条件では、知覚された奥行量は逆自乗法則に一致して増加した。第3の条件では輻輳が一定(輻輳角ゼロ)だったにもかかわらず、知覚された奥行量は単調に増加した。さらに、調節の効果を調べるため、+1および-1ジオプターのレンズをそれぞれの眼の前に挿入して、観察距離の関数として知覚された奥行量を測定した。その結果、知覚された奥行量は、第1の条件と同じで、凝視距離の増加にともなってほぼ単調に増加した。第3の条件および調節の効果を調べた実験結果から、Gonzalez et al. は、輻輳と調節は網膜像差のスケーリングに影響しない、おそらくスケーリングは垂直網膜像差などの網膜手がかりに依存しているだろうと結論した。

一方、視覚系は、比較的、近い距離においては輻輳手がかりを用いて奥行のスケーリングを行っていると言主張する研究がある<sup>53, 54)</sup>。最近、Mon-Williamsら(1999)<sup>53)</sup>、(2000)<sup>54)</sup>は、実際の3次元物体を刺激として用いたこれまでの研究を再分析したり、彼ら自身も3次元物

体を用いて100 cm以下の観察距離範囲で実験を行った結果、視覚系は輻輳手がかりを用いてペリディカルな奥行を知覚していると結論した。同様に、Viguier, Clement and Trotter (2001)<sup>55)</sup>も、手を伸ばせる距離範囲においては輻輳が信頼すべき距離手がかりを提供していると結論した。

東・中溝(1996)<sup>56)</sup>は、ハプロスコープを用いて刺激に対する調節と網膜像差の大きさを一定にした条件下で、輻輳の関数として知覚された奥行を測定し、輻輳が知覚された奥行量に一定の効果をもつことを明示した。刺激は、縦35 mm×横30 mmのランダムドットステレオグラムで、提示された網膜像差の大きさは、8' -32'であった。被験者は、知覚した奥行量を再生した。図10は、8名の被験者について知覚された奥行量の平均値を網膜像差

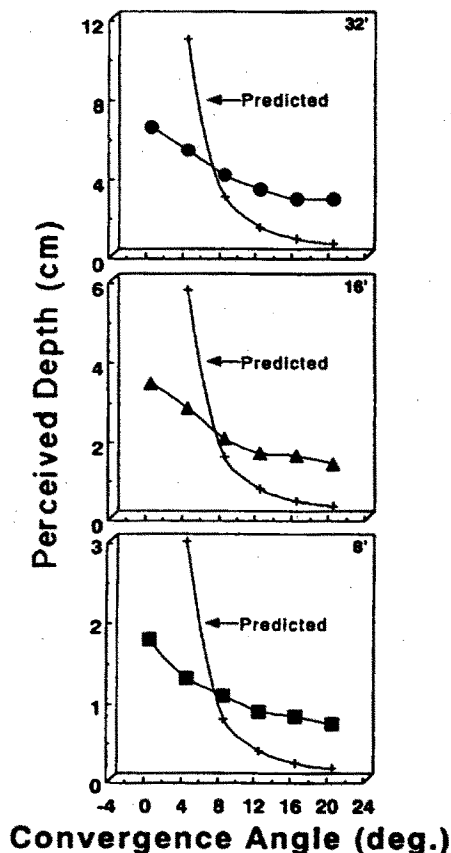


図10 輻輳の関数としての知覚された奥行量(東・中溝, 1996)。

別に示している（図の中の曲線は、理論的予測値を表す）。図からわかるように、調節と網膜像差が一定のとき、輻輳角が減少すると、知覚された奥行量は増加する。しかし、平均値は逆自乗法則にもとづいて予測される値からはかなり逸脱している。同様の結果は、Bradshaw, Glennerster and Rogers (1996)<sup>57)</sup>によっても得られている。これらの研究結果から、視覚系は確かに輻輳の情報を利用しているが、輻輳だけでは、近距離における完全な奥行恒常性を説明することは難しいと言える。

### 5.3 熟知した対象の大きさ手がかり

“熟知した対象の大きさ手がかり (familiar size)” が知覚された距離については知覚された奥行に影響することを示す結果が報告されている。O'Leary and Wallach (1980)<sup>58)</sup>は、熟知した対象の大きさ手がかりが奥行判断に一定の効果をもつことを示した。彼らの実験では、75 cm の距離に通常大きさ、あるいは縮小サイズの1ドル札が置かれ、その手前1 cm とその上1 cm に白色の円盤が提示された。その結果、通常サイズの条件より小さなサイズ条件のほうが1 cm の奥行をより大きく判断した。

同様に、Predebon (1993)<sup>59)</sup>の研究でも熟知した対象の大きさ手がかりが奥行判断に影響したことを示している。彼は、通常サイズと縮小サイズ (70%) の5ドル紙幣 (オーストラリアドル) を背景にして被験者に1 cm と2 cm の物理的奥行を判断させた。観察距離は、75 cm であった。その結果、通常サイズ条件では知覚された奥行は、ほぼベリディカルであったが、縮小サイズ条件のほうでは奥行の過大視が起った。この結果は、O'Leary and Wallach (1980)<sup>58)</sup>の結果を確認するとともに、熟知した対象の大きさ手がかりが奥行量の判断に影響することを示している。〔運動視差にもとづく見かけの奥行への熟知した対象の大きさ手がかり効果が Rivest et al. (1989)<sup>60)</sup> によって得られている。〕

### 5.4 スケーリングに利用されるその他の距離情報：見かけの距離説

以上に述べた3種類の距離手がかりの他にもスケーリングに用いられている距離情報についての仮説として、“見かけの距離”説がある。しかし、これまでの研究結果から、この仮説の妥当性について結論を出せるまでにはいたっていない。

Rivest et al. (1989)<sup>60)</sup>は、一定の観察距離 (80 cm) で、輻輳を変化させた (40-80 cm) 条件や熟知した大きさ (ドル紙幣のサイズ) を操作することによって見かけの距離を変化させた条件で運動視差にもとづく見かけの奥行を測定した結果から、視覚系は奥行のスケーリングに見かけの距離情報を用いていると結論した。一方、大塚・氏家・斎田 (1999)<sup>61)</sup>は、距離手がかりが“貧弱な”条件と“豊富な”条件下で運動視差にもとづいて知覚された奥行と知覚された距離とを調べた結果にもとづいて、運動視差のスケーリングが必ずしも知覚された距離によるわけではないと結論した。しかし、視覚系がどんな絶対距離手がかりを使おうと、その手がかりは見かけの距離にも影響する可能性をもっているため、知覚された奥行への距離手がかり効果と見かけの距離“効果”とを分離することは難しい。

### 5.5 視覚系が用いている絶対距離情報：暫定的結論

以上に述べてきた事実を考慮すると、とりあえず妥当な結論は、比較的観察者に近い距離 (<1.5-2 m) では、人工的環境の場合は主として輻輳手がかりを、日常的環境の場合は輻輳と他の距離手がかりにもとづいてスケーリングを行っている。しかし、2 m 以上の比較的、大きな距離範囲では、視覚系は認知的手がかり (とりわけ熟知した物体の大きさ手がかり) および視角の大きな物体では垂直網膜像差 (あるいは、differential perspective) を用いて奥行のスケーリングをしていると暫定的に結論できるだろう。

## 6. スケーリングの神経生理学的証拠

この節では、観察距離をパラメータにして網膜像差の提示に対する単一ニューロンの応答を調べた最近の数少ない研究を紹介する。

[空間の神経情報処理に関する従来の研究は、そのほとんどが両眼網膜像差にもとづく立体視(両眼立体視)に関するもので、視距離知覚についての研究はきわめて少ない。両眼立体視の神経生理学的研究については、Howard and Rogers (1995)<sup>63</sup>、Poggio and Poggio (1984)<sup>62</sup>のレビューを参照。] これらの研究によれば、ニューロン応答のレベルでも絶対距離情報にもとづく応答のスケーリングを示す証拠が得られている<sup>63, 64</sup>。

Trotter, Celebrini, Stricane, Thorpe and Imbert (1996)<sup>63</sup>は、マカクの視覚皮質 V1 のニューロンの網膜像差に対する選択的応答と観察距離 (20, 40, 80 cm) との関係を調べた結果、網膜像差検出ニューロンが観察距離に対して選択的に応答することを確認した。刺激は、ランダムドットステレオグラム (18° × 14°) で、カラービデオモニターに提示され、両眼前に置かれた赤-緑フィルターによるアナグリフ法を用いて 18-36 分までの非交差性または交差性網膜像差が 300 ms 提示された。サルは注視眼球位置は、赤外線眼球運動モニターによってチェックされていた。観察距離の変化は、ビデオモニターをルール上で動かすことによって行なわれ、刺激の輝度 1 cd/m<sup>2</sup> と網膜像サイズは 3 つの観察距離条件でほぼ一定に保たれた。また、輻輳のニューロン活動に及ぼす効果を調べるためにウェッジプリズムが両眼の前にセットされた (例えば、80 cm の注視距離でそれぞれの眼の前に 5 ジオプターのプリズムをセットすると、25 cm の輻輳距離と等しくすることができる。こうすることによって、輻輳がニューロン応答に及ぼす効果を独立に取り出すことができる)。

網膜像差選択性を調べた V1 のニューロン 139 個のうち、78 個のニューロンは異なる 2

つ以上の距離でその反応が分析された (39 個は 2 つの距離で、残りの 39 個は 3 つの距離で)。観察距離を変化すると、これらのニューロンの神経活動は、劇的に変化した。78 個のニューロンのうち 77 % のニューロンは統計的に有意に変化した。それらの応答変化にはいくつかのタイプがあり、距離を変えると応答がストップするもの、応答の量が変化するもの、網膜像差コードの尖度 (sharpness) が変わるものなどがあつた。

さらに、ニューロンの自発活動レベルが注視距離によって影響されるニューロンが見つかった。多くのニューロンは、注視距離が近くなると活動レベルが上昇した。しかもこの特性は、網膜像差選択性からは独立していた。例えば、自発活動レベルが最低のときにも、あるサイズの網膜像差に対して最大の応答が起るということが示された。注視距離による自発活動レベルの変調は、おそらく輻輳 (眼球位置情報) の影響、つまり網膜外信号によるものと考えられる。

結論として、V1 のニューロンの網膜像差提示に対する神経活動は観察距離によって変調されるということが確認された。この観察距離の効果は、プリズムを用いた輻輳の変化によってもある程度、再現された。これらの事実は、網膜および網膜外 (extraretinal) からの情報統合が V1 レベルという視覚情報処理の初期過程で起こりうるということを示している。つまり、外界の 3D 表現のための情報統合が初期過程で行われているということの意味する (しかし、この事実は、観察距離情報を用いた網膜像差のスケーリングに対応する皮質領域が V1 に限定されていることを意味しない。その理由の一つは、V3-V3A, MT, PO などでも網膜像差選択性をもつニューロンの存在が確認されているからである<sup>63</sup>。それらのレベルのニューロンでも網膜外からの情報によるニューロン活動の変調の可能性があつた)。

## 7. 結び

動物やヒトにとって外界の空間構造を正確に表現することは、とりわけ行動を成功に導くために不可欠であり、視覚系にはそのためのさまざまなメカニズムが備えられている。本稿では、それらのメカニズムがもつ機能原理の一つである奥行スケージングに関するこれまでの研究を概説した。

網膜像差あるいは運動視差にもとづいて知覚された奥行に及ぼす観察距離の効果を調べた研究の結果から、“視覚系が絶対距離の情報を用いて奥行をスケージングしている”ことが示された。さらに2種類の“運動—奥行錯視”においても観察距離が一定の効果をもつことが示され、これらの奥行効果にも絶対距離情報によるスケージングが関与していることが示唆された。さらにまた、単一ニューロンの応答に対する観察距離の効果を調べた神経生理学的研究からも、視覚皮質VIの網膜像差検出ニューロンの応答が観察距離によってスケージングされていることが明らかにされた。視覚系は、この種の奥行スケージング機能によって、外界の空間特性のペリディカルな復元をおこなうとともに、それにもとづいた行動調整をおこなっていると考えられる。

以上の考えが妥当である場合に、2つの問題が生じる。一つは、奥行スケージングの事実が確認されている網膜像差や観察距離の範囲（ペリディカルな距離や奥行の知覚が成立する範囲）を越えた実空間においては、奥行や距離はどのように処理しているかという問題である。おそらくその空間においては、事物の立体形状のゆがみや距離、奥行の誤判断が得られるだろう（例えば、月は球に見えるというよりも、むしろ平たい円盤に見える）。もう一つは、網膜像差と運動視差以外の奥行手がかりが生み出す奥行知覚についても、絶対距離によるスケージングが行われているかどうか、という問題である。奥行の手がかりには、網膜像差と運動視差という数量的奥行の手がかり以外にも奥行順序や質的な

奥行を信号する手がかりがある。例えば、単眼遮蔽（半遮蔽）、両眼遮蔽（重なり）、ダイナミック遮蔽、陰影やキャストシャドウ、遠近法手がかりなどである。これらの手がかりのみによっても明確な奥行印象が生じることが最近の研究で確認されてきているが（例えば、単眼遮蔽については Nakayama and Shimojo, 1990<sup>65</sup>; Shimojo, Tam and Nakamizo, 1999<sup>66</sup>、キャストシャドウについては、Ujike Shimokawa and Saida, 1995<sup>67</sup>など）、これらの奥行印象も絶対距離情報によるスケージングの対象になるのかという問題が残されている。

## 文 献

- 1) R. L. Gregory: *Eye and Brain: The psychology of seeing*. 5th ed. Oxford University Press, London, 1998.
- 2) H. Ono and J. Comerford: Stereoscopic depth constancy. W. Epstein (Ed): *Stability and constancy in visual perception*. Wiley-Interscience Publication, New York, 1977.
- 3) I. Howard and B. J. Rogers: *Binocular vision and stereopsis*. Oxford University Press, Oxford, 1995.
- 4) T. S. Collett and A. J. Parker: Depth constancy. V. Walsh and J. Kulikowsky (Eds): *Perceptual constancy: why things look as they do*. Cambridge University Press, 1998.
- 5) H. Wallach and C. Zuckerman: The constancy of stereoscopic depth. *American Journal of Psychology*, 76, 404-412. 1963.
- 6) A. H. Holway and E. G. Boring: Determinants of apparent visual size with distance variant. *American Journal of Psychology*, 54, 21-37, 1947.
- 7) T. S. Collett, U. Schwarz and E. C. Sobel: The interaction of oculomotor cues and stimulus size in stereoscopic depth constancy. *Perception*, 20, 733-754. 1991.
- 8) R. Cormack: Stereoscopic depth perception at far viewing distances. *Perception and Psychophysics*, 35, 423-428, 1984.
- 9) F. H. Durgin, D. R. Proffitt, T. J. Olson and K. S. Reinke: Comparing depth from binocular disparity to depth from motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 679-699, 1994.
- 10) J. M. Foley and W. Richards: Effects of voluntary eye



- movement and convergence on the binocular appreciation of depth. *Perception and Psychophysics*, 11, 423-427. 1972.
- 11) A. H. Fried: Convergence as a cue to distance. Doctoral dissertation, New School for Social Research, Dissertation Abstracts International, 34, 3427B, 1974.
  - 12) A. Glennerster, B. L. Rogers, M. F. Bradshaw: The effects of (i) different cues and (ii) the observer's task in stereoscopic depth constancy. *Inversigative Ophthalmology and Visual Science*, 35 (ARVO Abstract), 2112, 1994.
  - 13) A. Glennerster, B. L. Rogers, M. F. Bradshaw: Stereoscopic depth constancy depends on the subject's task. *Vision Research*, 36, 3441-3456, 1996.
  - 14) E. B. Johnston: Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, 31, 1351-1360, 1991.
  - 15) R. Ikeda and S. Nakamizo: Depth constancy in daily environment. 未発表, 1999.
  - 16) A. O'Leary and H. Wallach: Familiar size and linear perspective as distance cues in stereoscopic depth constancy. *Perception and Psychophysics*, 27, 131-135, 1980.
  - 17) M. Ritter: Effect of disparity and viewing distance on perceived depth. *Perception and Psychophysics*, 22, 400-407, 1977.
  - 18) M. Ritter: Perception of depth: processing of simple positional disparity as a function of viewing distance. *Perception and Psychophysics*, 25, 209-214, 1979.
  - 19) K. Shimono and S. Nakamizo: Stereoscopic depth perception as a function of absolute distance in stereonormal and stereoanomalous observers. *Perception*, 19, 362-363, 1990.
  - 20) 下野孝一, 中溝幸夫, 土田明美: 両眼網膜像差にもとづく見えの奥行量と絶対距離. *福岡教育大学紀要*, 39, 265-271, 1990.
  - 21) J. S. Tittle, J. T. Todd, V. J. Perotti and J. F. Norman: Systematic distortion of perceived three-dimensional structure from motion and binocular stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 663-678, 1995.
  - 22) H. Wallach, B. Gillam and L. Cardillo: Some consequences of stereoscopic depth constancy. *Perception and Psychophysics*, 26, 235-240, 1979.
  - 23) H. A. Sedgwick: Space perception. K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (Eds): *Handbook of Perception and Human Performance. Vol. 1. Sensory processes and perception*. John Wiley & Sons, New York, 1986.
  - 24) B. Rogers and R. Cagenello: Disparity curvature and the perception of three-dimensional surfaces, *Nature*, 339, 135-137, 1989.
  - 25) J. M. Loomis, J. A. Da Silva, N. Fujita and S. S. Fukushima: Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 906-921, 1992.
  - 26) 齋田真也, 中溝幸夫: 運動視差と奥行知覚. 第34回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 604, 1987.
  - 27) 中溝幸夫, 齋田真也: 運動視差: 研究史と最近の研究動向. *福岡教育大学紀要*, 39, 236-264, 1990.
  - 28) B. J. Rogers and M. E. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134, 1979.
  - 29) B. Julesz: Binocular depth perception of computer generated patterns. *Bell System Technical Journal*, 39, 1125-1162, 1960.
  - 30) M. Ono, J. Rivest and H. Ono: Depth perception as a function of motion parallax and absolute distance information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 331-337, 1986.
  - 31) 近江政雄: 運動視差にもとづく立体視. *日本視覚学会(編): 視覚情報処理ハンドブック*. 7章5節, 朝倉書店, 2000.
  - 32) C. L. Musatti: Sui fenomeni stereocinetici. *Archivo Italiano di Psicologia*, 3, 105-120, 1924 (Zanforlin (1988)<sup>33)</sup>より引用).
  - 33) M. Zanforlin: Stereokinetic phenomena as good gestalts. *Gestalt Theory*, 10, 187-214, 1988.
  - 34) F. S. Duncan: Kinetic art: psychokinematic objects. *Leonardo*, 8, 97-101, 1975.
  - 35) S. Nakamizo, M. Kondo and K. Shimono: Magnitude of perceived depth of stereokinetic cone as a function of absolute distance and eccentricity. *Perception*, 23 (suppl.), 44, 1994.
  - 36) S. Nakamizo and M. Kondo: Depth perception of stereokinetic cone and absolute distance information. *Japanese Psychological Research*, 37, 139-145, 1995.
  - 37) 中溝幸夫, 陳 蕾: Pulfrich 奥行効果と絶対距離情報. *VISION*, 10, 195-198, 1998.
  - 38) S. Nakamizo and R. Chen: The Pulfrich effect and depth constancy. *Japanese Psychological Research*, 42, 251-256, 2000.
  - 39) J. M. Foley: Binocular distance perception: Egocentric distance tasks. *Journal of Experimental Psychology:*

- Human Perception and Performance*, 11, 133-149, 1985.
- 40) 東山篤規：空間知覚。大山，今井，和気（編）：感覚知覚ハンドブック。誠心書房，768-801, 1994.
- 41) 近藤倫明，中溝幸夫：視距離。日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック。朝倉書店，2000.
- 42) A. S. Gilinsky: The moon illusion in a unified theory of visual space. *M. Hershenson (ed): The moon illusion*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1989.
- 43) A. Higashiyama and K. Shimono: How accurate is size and distance perception for very far terrestrial objects?: Function and causality. *Perception and Psychophysics*, 55, 429-442, 1994.
- 44) B. Gillam and B. Lawergren: The induced effect, vertical disparity and stereoscopic theory. *Perception and Psychophysics*, 34, 121-130, 1983.
- 45) 金子寛彦：立体視における垂直視差の役割。 *VISION*, 8, 161-168, 1996.
- 46) J. E. W. Mayhew and H. C. Longuet-Higgins: A computational model of binocular depth perception. *Nature*, 297, 376-378, 1982.
- 47) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 36, 253-255, 1993.
- 48) P. O. Bishop: Vertical disparity, egocentric distance and stereoscopic depth constancy: a new interpretation. *Proceedings of the Royal Society, London*, B237, 445-469, 1989.
- 49) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces. *Perception*, 24, 155-179, 1995.
- 50) H. Collewijn and C. L. Elkelens: Binocular eye movements and the perception of depth. *E. Kowler (Ed): Eye movements and their role in visual and cognitive processes*. Elsevier, Amsterdam, 1990.
- 51) 下野孝一，中溝幸夫，東山篤規：距離知覚とパーゼンス。 *心理学評論*, 43, 335-348, 2000.
- 52) F. Gonzalez, C. Rivadulia, R. Perez and C. Cadarso: Depth perception in random dot stereograms is not affected by changes in either vergence or accommodation. *Optometry and Vision science*, 75, 743-747, 1998.
- 53) M. Mon-Williams and J. R. Tresilian: Some recent studies on the extraretinal contribution to distance perception. *Perception*, 28, 167-181, 1999.
- 54) M. Mon-Williams, Tresilian, J. R. and A. Roberts: Vergence provides veridical depth perception from horizontal retinal image disparities. *Experimental Brain Research*, 133, 407-413, 2000.
- 55) A. Viguier, G. Clement and Y. Trotter: Distance perception within near visual space. *Perception*, 30, 115-124, 2001.
- 56) 東 巧，中溝幸夫：輻輳と網膜像差と知覚された奥行量の関係。 *VISION*, 8, 87-95, 1996.
- 57) M. F. Bradshaw, A. Glennerster and B. J. Rogers: The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues. *Vision Research*, 36, 1255-1264, 1996.
- 58) A. O'Leary and H. Wallach: Familiar size and linear perspective as distance cues in stereoscopic depth constancy. *Perception and Psychophysics*, 27, 131-135, 1980.
- 59) J. Predebon: The familiar-size cue to distance and stereoscopic depth perception. *Perception*, 22, 985-995, 1993.
- 60) J. Rivest, H. Ono and S. Saida: The role of convergence and apparent distance in depth constancy with motion parallax. *Perception and Psychophysics*, 46, 401-408, 1989.
- 61) 大塚聡子，氏家弘裕，斎田真也：運動視差のスケーリングと知覚距離。 *基礎心理学研究*, 17, 100-110, 1999.
- 62) G. F. Poggio and T. Poggio: The analysis of stereopsis. *Annual Review of Neurosciences*, 7, 379-412, 1984.
- 63) Y. Trotter: Cortical representation of visual three-dimensional space. *Perception*, 24, 287-298, 1995.
- 64) Y. Trotter, S. Celebrini, B. Stricanne, S. Thorpe and M. Imbert: Neural processing of stereopsis as a function of viewing distance in primate visual cortical area V1. *Journal of Neurophysiology*, 76, 2872-2885, 1996.
- 65) K. Nakayama and S. Shimojo: DaVinci stereopsis: Depth and subjective contours from unpaired points. *Vision Research*, 30, 1811-1825, 1990.
- 66) K. Shimono, W. J. Tam and S. Nakamizo: Wheatstone-Panum limiting case: Occlusion, camouflage and vergence-induced disparity cues. *Perception and Psychophysics*, 61, 445-455, 1999.
- 67) H. Ujike, Shimokawa and S. Saida: Effect of position and contour blurring of cast shadow on depth perception. *Perception*, 26 (suppl), 43-44, 1997.