

運動視差による奥行き知覚に関する研究

白岩 史^{*1} 林 武文^{*2}

要 旨

人間の視覚システムは、奥行きの判断において様々な視覚情報を利用して3次元世界の構造を知覚している。それらの情報の中で重要なものの1つが運動視差に基づく単眼立体視である。本論文ではまず、運動視差独自の問題である運動対象に関する幾何学的な関係と研究動向について述べる。その上で、運動視差自体が奥行きを知覚するための手掛かりとなるかを実験によって調査し、その結果を検討する。

A Study of Human Depth Perception from Motion Parallax

Aya SHIRAIWA Takefumi HAYASHI

Abstract

The human vision system perceives the structure of the 3-dimensional world using a variety of visual cues for depth information. Among those, one of the most important processes is the monocular stereopsis based on motion parallax. In the present research, we first investigated the geometric factors of moving objects, which is an inherent problem in a motion parallax study, and then referred to the direction of the research. On that basis, we investigated whether motion parallax is considered as an independent cue for depth perception using a psychophysical experiment and discussed the findings.

^{*1} 関西大学大学院総合情報学研究科

^{*2} 関西大学総合情報学部

1. はじめに

Marr (1982) は、視覚の初期過程（初期視覚）の目的を「網膜に投影された2次元画像データから3次元世界の可視表面の幾何学的構造を推測復元すること」と定義付けた。奥行きを知覚するために、3次元世界の情報は網膜に投影され、そのときの視細胞の反応が伝達される。3次元世界から得られる多数の情報がそれぞれモジュールとして処理され、さらにそれらの出力が統合されて、可視表面の形状を再構成する。これが、視覚情報を処理するために、現在幅広く受け入れられている基本的な考え方である。このモジュールは、両眼視差、運動視差、陰影、テクスチャ、遮蔽輪郭などであり、その存在は、Julesz (1960) のランダムドットステレオグラム (RDS) を用いた両眼立体視の実験によって明らかにされた。

本論文では、これらの奥行き手掛かりの要因のうちで特に運動視差に基づく単眼立体視に注目し、この運動視差からの奥行き知覚についての考察を行う。まず、運動視差に関する代表的な研究について述べる。さらに、両眼視差に基づく両眼立体視との類似点や相違点を述べ、運動視差独自の問題である対象運動視差と観察者運動視差に関する研究動向を概観する。さらに、運動視差自体が奥行きを知覚するための手掛かりとなるかを実験によって調査し、本稿をまとめる。

まず初めに、本論文で注目する運動視差と、その類似性が示されている両眼視差について、特に重要な研究について順を追っておおまかに述べる。

両眼視差は、ある一点を注視した際にその点より遠い点や近い点で生じる網膜像のずれ量のことである。Wheatstone (1838) によって、この両眼視差が強い奥行きの印象を生み出すことが初めて実験的に示された。彼の研究以降に行われたステレオスコープを用いたステレオグラムの観察はほとんどが輪郭を持つ図形であり、例えば、Helmholtz (1866/1925) は両眼視差による奥行き知覚には対象の輪郭線の一致が重要であることを主張した。しかしながら、Julesz (1960) によって、両眼視差刺激自体には輪郭線が無いにも関わらず、一定の輪郭を持つ奥行き面を知覚出来るRDSが作成された。刺激に輪郭線が無いということは、知覚された奥行き面の輪郭線は“両眼融合”が生じた後に生成されることが出来る。即ち、RDSは形態の手掛かりを含まない“純粋な”両眼視差手掛かりの効果を示したものであるとすることが出来るのである。

一方、運動視差は、観察者の網膜上に投影された対象について、対象の運動、観察者の運動、もしくはその両者の運動によって生じる相対的なずれ量のことである。運動視差が奥行き知覚の有効な情報源となることは、19世紀にWheatstone (1838) やHelmholtz (1866/1925) が指摘している。20世紀初めにはHeine (1905) によって運動視差の奥行き手掛かりとしての有効性が示された。彼は、2つの刺激の運動と身体の横方向の運動を連動させたとき、2つの刺激間に運動というより寧ろ奥行きが知覚されることを実験的に示したのである。これ以降、奥

行きと距離の情報の原因としての運動視差に対する研究は、両眼立体視についての同様の研究と比較して、あまり行われなかった。その中で注目すべき例外は、Gibsonらの研究である。Gibsonらは、運動視差が対象や観察者の運動に起因する多数の近接した刺激の変換のうちの1つに過ぎないことを指摘した（Gibson, 1950, 1966; Braunstein, 1976）。その他の網膜での変換は、視野内の運動によって作り出された光学的な拡張パターンや対象の回転によって作り出された網膜での変化のパターンを含んでおり、運動性奥行き効果（kinetic depth effect; Wallach & O'Connell, 1953）やステレオキネティック効果（stereokinetic effect）のことである。その後、Rogers & Graham (1979) の研究により、運動視差による奥行き知覚に対する手掛かりの独立性が明確に示され、この研究は1980年代以降の運動視差からの奥行き知覚の研究に対して特に重大な影響を及ぼした。また、このRogers & Graham (1979) による実験の方法は、Julesz (1960) がRDSを用いて両眼視差の奥行き知覚としての手掛かりの独立性を証明した実験方法の運動視差版と見なすことが出来る。

2. 運動視差について

2.1. 奥行き手掛かりとしての運動視差

前章で既に述べているが、Rogersらが行った一連の研究は1980年代以降の運動視差からの奥行き知覚に対する研究に対して特に重大な影響を及ぼした。ここでは彼らが行った3つの研究について述べる。

2.1.1. Rogers & Graham (1979) 独立した手掛かりとしての運動視差

Rogers & Graham (1979) は、自己運動及び対象運動によって運動速度勾配を持つランダムドットパターンを提示することにより、運動視差が奥行き手掛かりとなるかどうかを調査した。自己運動条件では、被験者の頭部運動に連動して刺激が動き、運動視差が作り出される。このときディスプレイは静止している。対象運動条件では、被験者は静止しており、ディスプレイの左右の動きに連動して刺激が動き、運動視差が作り出される。彼らは、この実験において、両眼立体視の研究のためにJulesz (1960) が開発したランダムドットの技術を用いた。JuleszのRDSは、両眼視差以外の奥行きや距離の手掛かりが全て取り除かれている。彼らは、運動視差に関する初期の多くの研究で用いられた刺激はごくわずかな光や発光体から成っていたが、全体から見て、運動視差の有効性は複雑で情報量の多い刺激パターンを用いた研究によってもたらされたと考え、運動視差情報を与えるためにランダムドットパターンを使うことによって、自己運動や対象運動以外の奥行き手掛かりを全て取り除いたのである。また、観察条件として用いた自己運動条件は、これまでにないものであった。

1つ目の実験の目的は、運動視差が他の手掛かりが無い状況で奥行きに対する効果的な手掛かりとなり得るかを調査することであった。彼らは、自己運動と対象運動の観察条件下で、刺

激の形状（矩形波，正弦波，三角波，傾面波），波形の数（1，3，5個）を組み合わせた全24試行の実験を行った。被験者の課題は，まず提示されたランダムドットパターンが平らに見えるか，3次元的に見えるかを報告することであった。このとき，提示された刺激パターンが3次元的に見えたなら，以下の3項目についても報告した。それらは，（1）面の形状，（2）波形の数，（3）面の凹凸の方向であった。なお，被験者は単眼で観察を行った。

実験の結果，両方の観察条件において，頭部及びディスプレイが静止している場合，提示された刺激パターンは平らに見え，運動している場合，3次元的に見えた。波形の数，奥行き方向は，両方の観察条件の全ての試行で正確に報告された。面の形状に関しては，矩形波，正弦波，傾面波については正確に識別されたが，三角波に関しては，被験者12人中，自己運動条件で5人，対象運動条件で6人が正弦波と混同した。これより，運動視差が他の奥行き手掛かりを欠いた状況でさえ，3次元面の形状と奥行きに対する効果的な手掛かりとなり得ることが実証された。

2つ目の実験の目的は，ディスプレイ上で知覚された奥行き量に関して，被験者の運動視差による奥行き知覚の正確さを調査することであった。観察条件，刺激の形状は実験1と同じであり，波形の数は3個で固定された。その上で，3種類の振幅条件（10.6min，23.2min，50.4min）が設定され，全24試行が行われた。被験者は，頭部またはディスプレイの運動が4～6回行われた後で（この間，運動視差により刺激が提示されるディスプレイ（運動視差ディスプレイ）に刺激が提示されており，運動中に3次元立体が知覚される），両眼視差により刺激が提示されるディスプレイ（両眼視差ディスプレイ）を観察し，運動視差ディスプレイ上で知覚された奥行き量と両眼視差での奥行き量が一致するまで，刺激の両眼視差を調節した。なお，両眼視差ディスプレイに提示された刺激は，運動視差ディスプレイに提示された刺激と同等である。運動視差ディスプレイは単眼で，両眼視差ディスプレイは両眼で観察した。

実験の結果，運動視差振幅の増加と共に，奥行き量が増加した。観察条件による違いについて，知覚された奥行き量は，対象運動条件より自己運動条件のほうが，どの振幅条件においても大きかった。また，両方の観察条件において，面の形状の違いによる奥行き量の差はなかった。

以上の2つの実験結果から，Rogers & Grahamは，（1）運動視差のみで，3次元面の形状と奥行きに対する十分な手掛かりとなる，（2）自己運動，対象運動共に，奥行き手掛かりとなる，（3）奥行きに関する定量的で正確な情報となる。具体的には，運動視差振幅の増加と共に奥行き量が増加し，面の相対的順序の判断も正確である。また，両眼視差と同等の説得力のある3次元的印象を作り出す，と結論付けた。また，この実験での付随運動に関して被験者は，両方の観察条件下で，運動中に付随運動を伴わない剛体的で静止した3次元面が見えると主張した。なお，付随運動とは，自己運動中に見られる刺激の見掛け上の運動のことであり，普通，注視点の前にある刺激は頭部運動の方向とは逆方向に，注視点より後ろにある刺激は同方向に動いているように見える（Gogel, 1990）。

また、この報告は、Braunstein (1966, 1968, 1976) が報告した対象運動中の付随運動の効果と一致している。

2.1.2. Rogers & Graham (1982) 運動視差と両眼立体視の類似性

次にRogers & Graham (1982) は、運動視差と両眼視差の奥行き知覚感度を測定し、両方のシステムの理論的な比較を行った。これらの比較を行う根拠は、(1) 運動視差及び両眼視差によって得られる奥行き印象が類似していること、(2) 運動の最初と最後の2枚の網膜像の差異を検出することにより運動視差情報を得ることが、同時に2枚の網膜像の差異を検出することにより両眼視差情報を得ることと、運動距離が両眼間距離と同じであれば、得られた2枚の網膜像について一致するからである。なお、両眼視差に関しては、Tyler (1974) が、刺激波形の空間周波数が視角にして1 cycle/deg (c/deg) 以上になるときに感度が大幅に減少すると報告している。その後、Tyler (1975) は、ランダムドットパターンではなく、線状のステレオグラムを用いた研究であるが、正弦波状に奥行きを知覚出来る線刺激に対する感度が、高周波数と低周波数の両方で減衰することを示している。

この実験の目的は、奥行き知覚感度の観点から、運動視差及び両眼視差の両システムを比較することであった。運動視差による奥行き知覚感度測定時、被験者はRogers & Graham (1979) のときと同じ方法で、自己運動によって刺激パターンを観察した。このとき被験者は単眼で観察を行った。刺激の空間周波数は0.05-1.6c/degで、波形の数だと1-32に相当する6種類である。両眼視差による奥行き知覚感度測定時は、立体視鏡を用いて両眼で刺激を観察した。刺激は運動視差の場合と同等である。1つの実験に対して、ランダムな順に6種類の空間周波数の刺激が提示され、8回繰り返し、全48試行の実験を行った。被験者がランダムドット面における奥行きを知覚出来、波形の数を正確に報告出来るまで、運動視差または両眼視差の振幅が増加された。被験者は、面を3次的に知覚したときにキーを押下し、その時の波形の数を報告した。そのときの視差量を閾値として記録し、その逆数を感度とした。

実験の結果、運動視差及び両眼視差の空間周波数に対する感度は両方も、視角にして約0.2-0.5c/degでピークを示し、高周波数と低周波数で感度が減衰した。これはCampbell & Robson (1968), Tyler (1974), Schumer & Ganz (1979) の報告と同様である。但し、両眼視差から知覚された奥行きに対する感度は、運動視差から知覚された奥行きに対する感度と比較して約2倍高いという結果になった。さらに、刺激波形の空間周波数が1 c/deg以上であるときの感度の減少は、刺激のドットパターンを作り出す要素の大きさに起因すると論じられていたが、彼らは他の実験において、ドット密度を倍にしても高周波数での閾値に影響を与えないことを見出した。一方で、低周波数での感度の減少には、ディスプレイ上での刺激の眼に見える波形の数に起因すると報告した。付随運動に関して、彼らは波形の空間周波数が視角にして2 c/degより小さいときは起こらないとしているが、これより大きいときは、奥行き印象を得る前にしばしば付随運動が知覚されると報告している。

以上の実験結果より、彼らは、(1) 運動視差及び両眼視差による奥行き知覚感度は、空間周波数が約0.2-0.5c/degのときに最大となり、低周波数域と高周波数域では感度が減衰する、(2) 両眼視差による感度のほうが、運動視差による感度より約2倍高い、(3) 感度関数の類似より、以前に考えられていた以上に2つのシステムの特性の類似性が示唆される、と結論付けた。

2.1.3. Rogers & Collett (1989) 運動視差と両眼視差によって知覚される面の見え方

さらに、Rogers & Collett (1989) は、両眼視差と運動視差の手掛かりからの奥行き情報が、視覚システムでどのように統合されるかを調査した。これ以前の多くの3次元知覚研究の目的は、異なる手掛かりが別々に提示されたときの有効性を示すことであった。しかし、視覚世界を解釈するときに異なる情報源から3次元情報がどのように組み合わせられるかという問題にも注目が向けられ始めた。Rogers & Collett (1989) もこの研究で、垂直方向に奥行きが変化し、水平方向には奥行きが一定の波形面の見え方を調査することによって、この問題に取り組んだ。彼らの用いた波形面は、運動視差と両眼視差を様々な割合で組み合わせたものである。この研究の目的は、(1) 様々な割合で組み合わせられた運動視差と両眼視差から成る3次元波形面について知覚された奥行きの大きさを測定する、(2) 視覚システムが3次元面の構造について、明らかに相反する情報をどのように処理するかを判断することであった。

一連の実験で共通する方法として、被験者はRogers & Graham (1979) で用いられた方法と同様に、対象運動によって提示された刺激を観察した。2つのディスプレイが被験者の視線を横切るように、前額平行面上を左右に運動する。但し、運動視差のみで知覚される面を単眼で観察するときは、2つのディスプレイのうちの1つは使用されなかった。刺激として、(1) 運動視差、(2) 両眼視差、(3) 両方の組み合わせ、の条件により奥行きを知覚出来る波形が用いられた。被験者の課題は、テスト面に提示された刺激パターンから知覚された奥行き量と同じになるまで、標準マッチング面(両眼視差ディスプレイ)の奥行き量を調節することであった。

初めの実験は、運動視差のみにより刺激波形が定義された面を単眼で観察し、その波形面の知覚された奥行き量と見掛け上の軌道を測定するために行われた。被験者は単眼で刺激を観察し、マッチングを両眼で行った。単純な幾何学により、波形面が前額平行面上で平行移動しているときに、運動視差量は波形面の最大振幅に対して単調関数になることが示されている。即ち、平行移動する面の軌道が直線的で前額平行面上にあると仮定するなら、波形面の奥行き量は運動視差量から予測出来るのである。しかしながら、その逆も考えられる。従って、この見掛け上の奥行き量の測定は、視覚システムが、運動視差と両眼視差のある割合での組み合わせを、前額平行面上で直線的に平行移動する頑健的な面だと解釈するかどうかを正しく判断するために用いられる。この結果、知覚された奥行き量と仮説に基づく予測値がほぼ一致した。これは、視覚システムが運動視差情報を、剛体で前額平行面上を直線的に動く面として正確に解

積していることを表す指標となる。また被験者は、面が左右に動いているときに、面が変形したり、回転したりするようなことはなかったと報告した。

次に、運動視差と両眼視差を様々な割合で組み合わせて刺激ボタンを作り、その奥行き量を調査した。

まず、運動視差と両眼視差の手掛かり間の相互作用を調べる最初の段階として、運動視差により奥行きを知覚出来る波形面と両眼視差が0の平面として定義された面を用いた。要するに、実験で用いられた刺激は全く同じ運動視差を持つ2枚のランダムドットボタンであり、この2枚のボタンは一致しているので対応要素間の両眼視差は0となる。被験者は刺激の観察及び課題を両眼で行った。実験の結果、知覚された波形面の奥行き量は、運動視差の増加に伴い単調に増加したが、実験1で観察された奥行き量の約半分であった。また被験者は波形面が垂直軸について“凸”状に回転し、時々波形の位相が逆転すると報告した。

また、同じ位相の運動視差と両眼視差を異なる割合で組み合わせて定義した波形面を用いてマッチングを行った。その結果、波形面の知覚された奥行き量は運動視差量が増加するにつれてわずかに増加した。しかし、この増加量は両眼視差量が増加すると共に小さくなった。即ち、知覚された奥行き量を運動視差量に関連付ける関数は、両眼視差が増加するにつれて平らになる。両眼視差0のときと同様に、垂直軸についての“凸”回転も見られた。さらに追加実験において、この変化が、両眼視差の最大振幅の勾配に基づくものであるか、両眼視差による面の空間周波数の勾配に基づくものであるかを調査した。このとき、両眼視差は2minで固定され、3種類の空間周波数条件(0.1, 0.2, 0.4c/deg)が設定され、運動視差は0-12minの間で変更された。もし知覚された奥行き量と運動視差の関係が両眼視差の最大振幅の勾配にのみ依存するのであれば知覚された奥行き量を運動視差量に関連付ける関数の傾きは空間周波数について変化せず、空間周波数の勾配に依存するのであれば空間周波数の減少と共に関数の傾きは急になる筈である。追加実験の結果、関数の傾きは空間周波数の減少と共に急になった。これにより、両眼視差の空間周波数の勾配は、ある運動視差成分によって引き起こされた奥行きの大きさを決定する重要な要因であると考えられる。加えて、空間周波数の減少と共に垂直軸についての“凸”状の回転量が増加した。さらに、逆位相の運動視差と両眼視差を異なる割合で組み合わせて波形面を提示した場合は、垂直軸について“凹”状の回転が見られた。

以上の結果よりRogers & Collettは、(1) 単眼で観察し、運動視差のみにより奥行きを知覚出来る面は、前額平行面上を平行移動する頑健な波形面として知覚され、その奥行き量は運動視差量と共に単調に増加する、(2) 両眼で観察し、運動視差と両眼視差0を組み合わせた面は、左右の平行移動に伴い、垂直軸について回転しているように知覚され、奥行き量は運動視差のみ(単眼で観察)の場合の約半分である、(3) 運動視差と両眼視差を組み合わせたとき、波形の両眼視差の空間周波数による勾配が小さい場合、運動視差だけが知覚された奥行き量に影響を与える、(4) 視覚システムは運動視差及び両眼視差による奥行き信号の矛盾を最小化すると考えられる、と結論付け、さらに彼らは、運動視差情報が回転と奥行きの間でトレード

オフ関係にあることを示唆した。

2.2. 運動視差と両眼視差の類似点及び相違点

前節で示したように、Rogers & Graham (1982) は、運動視差と両眼視差のシステムの類似性を明らかにした。運動視差と両眼視差の幾何学的な性質を考えた場合には、運動視差における頭部または対象移動量を両眼視差における両眼間距離に置き換えれば、運動視差と奥行きとの関係は両眼視差と奥行きの関係に等しくなる。このような性質の類似により、以下に示すような運動視差と両眼視差による奥行き知覚の比較の検討が、多く行われている。

前述の通り、Rogers & Graham (1982) は、運動視差及び両眼視差により正弦波状に変化する奥行きを検出するための閾値の空間周波数特性を測定した。その結果、運動視差による感度のほうが、両眼視差による感度に比べて2倍ほど低かったが、どちらの視差についても、0.2-0.5c/degの空間周波数に対して、感度が最高になり、その低周波数域と高周波数域で感度が低下する、逆U字型の感度関数が示された。また、Anstis, Howard & Rogers (1978) は、Creik-O'Brien-Cornsweet錯視刺激状に変化する面の外側部が、異なった奥行き面に配置されているように知覚されることを報告した。これと同様の効果が運動視差でも見られ、その効果の大きさも両眼視差と運動視差で同様であることがRogers & Graham (1983) によって示された。Graham & Rogers (1982) は、奥行き残効（一定時間奥行きを観察した後に平面が逆向きの奥行きに知覚される効果）をキャンセル法により測定し、両眼視差及び運動視差による面で同程度の残効が見られること、両眼視差による残効が運動視差によってキャンセルされ、またその逆も成り立つことを報告した。さらに、彼らは、同時対比効果（周囲の奥行きによって中心部の平面が逆向きの奥行きに知覚される効果）の強さをキャンセル法により測定し、どちらの視差による面であっても同時対比効果の特性が類似していることを報告した。また、後述するが、Ono & Ujike (2005)、Ono & Wade (2005) により、観察者の頭部運動による運動視差量と奥行き及び運動の知覚の関係が示された。それによると、頭部運動速度が約13cm/s以上の場合に、奥行き知覚が生じる運動視差の閾値、運動視差量と知覚的奥行き量が線形を保つ範囲、運動視差による奥行きが最大となる点、奥行き知覚が生じる運動視差の上限が存在する。この結果は、Tyler (1991) によって示された両眼視差と知覚的奥行き量との関係と同様の関係である。この関係においては、奥行き知覚が生じる両眼視差の閾値、両眼視差量と知覚的奥行き量が線形を保つ範囲、両眼視差による奥行きが最大となる点、奥行き知覚が生じる両眼視差の上限が存在する。運動視差による奥行き知覚が最大となる運動視差量以上では、頭部運動に付随した運動の知覚が生じるが、これは両眼視差の場合の二重像の知覚に対応すると考えることが出来る。

このように、運動視差と両眼視差には様々な類似点が見られるが、以下に挙げる様な相違点も存在する。即ち、(1) 運動視差は単眼性であり、両眼視差は両眼性である、(2) 運動視差は動的であり、両眼視差は静的である、(3) 運動視差の情報は一つの視点からの像の時間に

伴う変化であり、両眼視差は同時に観察された2つの視点からの像の違いである、(4)奥行きを求めるために、運動視差では頭部または対象移動が必要であり、両眼視差では両眼間距離が必要である、などである。さらに、両眼視差による奥行き知覚に関して、約30%の人々に何らかの形の異常があると言われているが(Richards, 1970)、頭部運動による運動視差に関して、奥行きが知覚されないという報告はこれまでにない(Howard & Rogers, 2002)。さらに、Rogers & Graham (1982)は、運動視差と両眼視差に関するある重要な相違点を報告した。それは、両眼視差の解釈が曖昧でない点でも、運動視差の解釈が常に曖昧になるということである。彼らはこの曖昧性を運動からの構造復元の解釈が、網膜像における時間的な変化に基づくためとした。この網膜像における変化は時間と共に生じるため、構造や形状における変化も起こる可能性が常に存在するというものである。しかしながら、両眼視差は、同時に2枚の網膜像の差異を検出することにより得られるために時間的不確定性を持たない。

2.3. 観察者運動視差と対象運動視差

Rogers & Graham (1979)の研究でも用いられているが、運動視差には観察者の運動によるもの(自己運動)と対象の運動によるもの(対象運動)がある。自己運動による観察者運動視差は静止した対象を観察者が頭部または身体を運動させながら観察する場合に生じ、対象運動による対象運動視差は運動する対象を静止した観察者が観察する場合に生じる。以下に、両者の幾何学的関係及び代表的な研究の概観を述べる。

2.3.1. 観察者運動視差

観察者が運動し、対象Aが静止している場合(図1(a))に、観察者の頭部から静止している外界の対象Aまでの距離がDであり、頭部がMだけ運動すると仮定すると、対象Aに対する運動視差は、点Aに対する頭部位置 H_1 と H_2 の方向の差となるので、 θ_1 と θ_2 の和、即ち θ_A により表すことが出来、絶対的な運動視差は式(1)として表される。

$$\theta_A = \frac{M}{D}. \quad (1)$$

原理的にはもしMが与えられたならば視覚システムは θ_A を用いてDを計算することが出来る。さらに、頭部運動を行いながら奥行き位置の異なる2点の静止対象A及びBを観察した場合(図1(b))、観察者から対象Bまでの距離をD+dとすると、点Bに対する運動視差(θ_B)は以下の式(2)で表すことが出来る。

$$\theta_B = \frac{M}{D+d}. \quad (2)$$

式(1)及び式(2)より、相対的な運動視差 Ω は、

$$\Omega = \theta_A - \theta_B = \frac{Md}{D(D+d)} \cong \frac{Md}{D^2} \quad (3)$$

で表される。式(3)より、

$$d \cong \frac{\Omega}{M} D^2. \quad (4)$$

この関係より、運動視差 Ω 、頭部運動距離 M 、対象の距離 D より、対象の奥行き d が求まり、頭部運動距離と運動視差の比が一定ならば、奥行き d は絶対距離 D の2乗に比例することが分かる。

2.3.2. 対象運動視差

観察者が静止し、対象 A が運動している場合(図2(a))に、観察者の頭部から前額平行面上を運動している対象 A までの距離が D であり、点 A が m だけ運動すると仮定する。運動の結果、点 A の方向は角度 θ_A だけ変化し、これが絶対的な対象運動視差であり、式(5)として表される。

$$\theta_A = \frac{m}{D}. \quad (5)$$

式(5)は原理的には式(1)と等価である。また、原理的には、もし m が与えられたならば視覚システムは θ_A を用いて D を計算することが出来る。さらに、前額平行面上を異なる奥行き位置で同じ速度で運動する2点、対象 A 及び B を観察した場合(図2(b))、観察者から対象 B までの距離を $D+d$ とすると、点 B に対する運動視差(θ_B)は以下の式(6)で表すことが出来る。

$$\theta_B = \frac{m}{D+d}. \quad (6)$$

式(5)及び式(6)より、相対的な運動視差 ω は、

$$\omega = \theta_A - \theta_B = \frac{md}{D(D+d)} \cong \frac{md}{D^2} \quad (7)$$

で表される。式(6)は式(2)と、式(7)は式(3)と原理的には等価である。式(7)より

$$d \cong \frac{\omega}{m} D^2. \quad (8)$$

この関係より、運動視差 ω 、対象運動距離 m 、対象の距離 D より、対象の奥行き d が求まり、

対象運動距離と運動視差の比が一定ならば、奥行き d は絶対距離 D の 2 乗に比例することが分かる。さらに、式(5)及び式(6)より、

$$\begin{aligned} \theta_B(D+d) &= m \\ \theta_B D + \theta_B d &= \theta_A D \end{aligned} \tag{9}$$

$$d = \frac{D(\theta_A - \theta_B)}{\theta_B}.$$

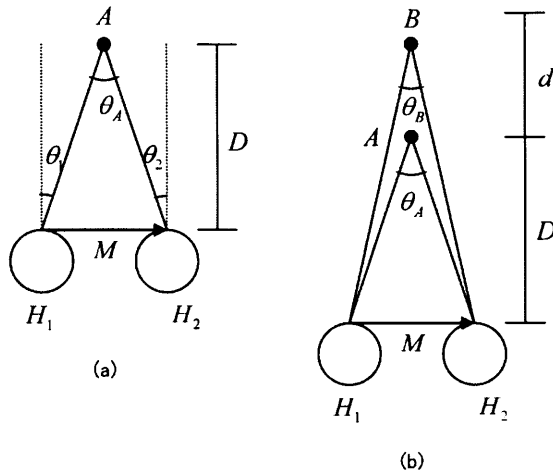


図 1 (a) 観測者が運動している場合の静止対象の運動視差. (b) 相対的な運動視差.

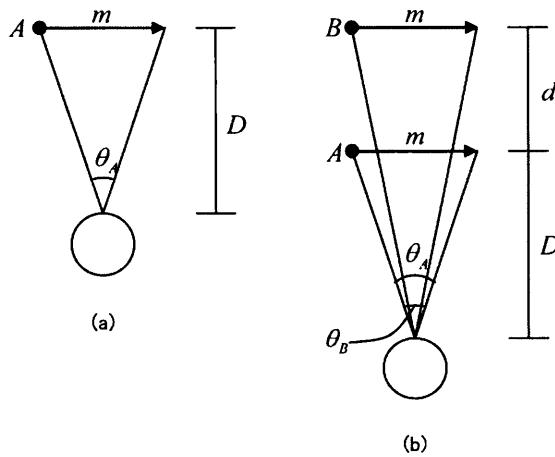


図 2 (a) 観測者が静止している場合の運動対象 A の運動視差. (b) 観測者が静止している場合の異なる位置、同じ速度で前額平行面上を運動する運動対象 A, B の相対的な運動視差.

この関係より、運動視差 θ_A 、 θ_B 、距離 D を用いて、2点 A 、 B の奥行き d を計算することが出来る。

2.3.3. 研究動向

2.3.3.1. Ono & Steinbach (1990) 自己運動時及び対象運動時の単眼立体視

Ono & Steinbach (1990) は、Rogers & Graham (1979, 1982) のランダムドットの提示技術を用いることにより、2次元スクリーン上の運動によって作り出される知覚を、その運動が頭部運動と連動するとき（自己運動）と連動しないとき（対象運動）とで比較した。この実験において、（1）知覚された奥行きの大きさと（2）知覚されたドットの運動の大きさ（付随運動）が比較された。

観察条件は、自己運動と対象運動の2つであった。最初の実験において、これら2つの観察条件下で、刺激の形状（正弦波、三角波、鋸波、矩形波）と運動視差（12min, 1 deg53min）を組み合わせた刺激が提示された。繰り返しを4回行い、全64試行の実験を行った。波形の周期は2周期であった。1ブロック内で刺激はランダムに提示され、2種類の運動視差のうちの1つがランダムに選択された。このとき自己運動と対象運動は同じ運動視差条件で一組にされ、実験は、各刺激に対するそれぞれ4試行のうちの2試行が自己運動で始まり、残りの2試行が対象運動で始まった。被験者の課題は、（1）奥行き量と（2）ドットが平行移動しているように見えるかどうかを報告することであった。なお、被験者は単眼で刺激を観察した。

実験の結果、自己運動条件のほうが対象運動条件より知覚された奥行き量が大きく、付随運動は小さかった。特に、運動視差が12minのときに、自己運動条件では付随運動が0に近い結果となった。さらに、知覚された奥行き量は、大きいほうから、正弦波、三角波、鋸波、矩形波の順であったが、付随運動の大きさは、この逆の順であった。このことは、知覚された奥行き量と付随運動量のトレードオフを示唆し、Ono, Rivest & Ono (1986) により対象運動条件についてこのようなトレードオフが見られることが指摘されている。但し、このようなトレードオフが何故起こるのかは明らかではない。また、被験者は、矩形波を観察したときに運動方向に対して垂直な運動が起こり、それ以外の刺激では運動方向と平行な、垂直軸について回転する運動が起こると報告した。これにより、“剛体性の拘束”は矩形波以外の刺激について処理されるが、矩形波刺激に対しては処理されないことが考えられる。以上より、Ono & Steinbachは、自己運動情報が与えられたとき、Rogers & Graham (1979) が用いた刺激の網膜上運動の範囲内では、付随運動を知覚せずに奥行きを知覚を引き起こすことが出来ることを示した。また、刺激の形状の違いにより付随運動の大きさが異なるので、Wallach (1985) によって提案された運動が知覚されない領域 (immobility range) の範囲は、Ono & Steinbachのデータに基づき、刺激の特性に依存することが示唆された。ところで、対象運動条件の矩形刺激に対して奥行きが知覚されたことは、彼らにとって予想外のことであった。彼らの予想は、被験者は奥行きを知覚出来ず、1枚の面内で逆方向に動いているスクリーン上の

異なる面を知覚する、というものであった。奥行きが知覚されたのは、自己運動条件により矩形刺激に奥行きを知覚するための知識が、予測として蓄えられたためではないかと仮定した。この予測の効果を最小にするために、彼らは2つ目の実験を設計した。

2つ目の実験は、最初の実験での奥行き知覚における予測の効果を最小にするために行われた。それ故に、観察条件ごとに別の被験者を募った。初めの実験に参加した被験者はいない。刺激の形状は正弦波と三角波を用い、運動視差は1 deg53minに固定した。試行回数は4試行であった。奥行きを知覚するための予測の効果を最小にした結果、奥行き量は自己運動条件のほうが対象運動条件より大きく、対象運動条件においては矩形刺激に奥行きを知覚出来なかった。奥行き量は正弦波刺激のほうが矩形波刺激よりも大きかった。付随運動量に関しては、奥行き量とは逆の結果となった。また、2つ目の実験においても、知覚された奥行き量と付随運動量にトレードオフが見られ、条件間で見られたのと同様に被験者間でも見られた。

以上より、Ono & Steinbachは、(1) 自己運動か対象運動かで知覚に明らかな差異がある、(2) 知覚された奥行き量は自己運動条件のほうが対象運動条件のほうが大きく、付随運動に関してはその逆である、(3) 知覚された奥行きと付随運動にはトレードオフの関係が見られる、(4) 単眼立体視に、異なるメカニズムが自己運動か対象運動かという点で関与している、(5) 付随運動の閾値は奥行き知覚閾値より高い、と結論付けた。さらに彼らは、網膜上運動像は自己運動に関する情報によって補正を受けており、網膜上運動像が自己運動により作り出される場合、視覚システムは静止した面の知覚を作り出すために運動の信号を奥行き情報に変換すると主張した。

2.3.3.2. Ujike & Ono (2001) 自己運動時の運動視差による奥行き知覚の閾値

観察者運動視差の点から、Ujike & Ono (2001) は、運動視差から奥行きを知覚するための閾値を小さくするための要因を調べた。可能性のあるものは、相対画像速度、即ち等価視差 (Ono & Ujike, 1994; Ono, Sato, Shioiri & Ujike, 1998) と頭部運動速度と相対画像速度の比 (Rogers & Graham, 1982; Steinbach, Ono & Wolf, 1991) である。この実験では横方向の頭部運動速度が変えられ、頭部運動速度と相対画像速度の比率が測定された。なお、ここでの相対画像速度 (等価視差) とは、2枚の画像の速度の差である。

まず奥行き知覚閾値を、頭部移動距離 (5, 10, 20, 30cm) と正弦波状の頭部移動速度 (0.083, 0.125, 0.167, 0.25, 0.33, 0.50, 0.67, 1.00, 1.30Hz) を変えることにより測定した。刺激は4段の正弦波状の帯 (各20周期) から成り、1, 3段目の組、2, 4段目の組が同方向に動き、それぞれの組は逆方向に動いた。被験者はロッドの上に顎を乗せて頭部運動を行い、奥行きを知覚出来なくなるまで、頭部運動速度に対する相対画像速度の比率の調節を手でノブを操作することにより行った。観察は単眼で行われた。なお、全ての条件が行われたわけではなく、移動距離が大きく、速度が速いためにロッドが正確に従えない場合と、練習試行において被験者が奥行きを知覚出来なかった条件での実験は行われなかった。この結果、最大頭部移動

速度が速い場合には、頭部運動速度と相対画像速度の比率により閾値が決定され、遅い場合には相対画像速度のみによって決定された。

さらに、頭部運動距離を固定(30cm)し、頭部運動を一定速度(3.92, 7.89, 15.8, 31.6, 60.0cm/s)で行うことにより奥行き閾値を測定した。この目的は、最初の実験における結果が頭部運動の加速と減速部分に依存するかどうかを調べるためである。そのために、頭部運動の始めと終わりの5cmの部分では刺激は提示されず、一定速度で動いた中央の20cmの部分だけで刺激が提示された。従って、刺激の提示時間は各頭部運動速度に対して、それぞれ5.10s, 2.53s, 1.27s, 0.63s, 0.33sであった。被験者の課題は、奥行きを知覚出来なくなるまでノブを操作することにより相対画像速度の比率を調節することであった。実験の結果、1つ目の実験と同様に、最大頭部移動速度が速い場合には、頭部運動速度と相対画像速度の比率により閾値が決定され、遅い場合には相対画像速度のみによって決定された。また、これより頭部運動速度が速い場合の奥行き知覚閾値の増加が刺激の提示時間の減少には起因していないことが明らかとなった。

以上より、Ujike & Onoは、(1)奥行きを知覚するための運動視差の閾値は頭部運動速度に依存する、(2)奥行き知覚閾値は、頭部運動速度が約13cm/sより遅い場合、運動知覚閾値(相対画像速度約0.26min/s)が奥行き知覚閾値を決定し、それ以上で運動及び奥行きを知覚する。即ち、相対画像速度のみによって奥行き知覚閾値が決定される、(3)頭部運動速度が約13cm/sより速い場合、相対画像速度が約0.5-1min以上で奥行きを知覚し、それは頭部運動速度と相対画像速度の比率により決定される、と結論付けた。

2.3.3.3. Ono & Ujike (2005) 自己運動速度、運動視差に対する視覚的安定性と付随運動

さらに、Ono & Ujike (2005)は、奥行き知覚閾値と付随運動閾値を調べることにより、視覚的安定性を頭部運動速度及び運動視差の観点から調査した。先行研究で、Wallach (1985)によって、頭部運動と同方向、もしくは逆方向に動く刺激の運動の比率を変えることにより、固定された距離における刺激の視覚的安定性が調べられている。彼は、その比率が1に近づけば知覚が安定し、1から大きく外れると見掛け上の付随運動(Gogel, 1990)が知覚されると結論付けている。

1つ目の実験の目的は、奥行き知覚閾値と、奥行きの知覚に付随運動を伴うかどうかの境界(付随運動知覚閾値)を見出すことであった。被験者の個人差に合わせて調節するため、奥行き知覚閾値に対しては7種類の頭部運動速度条件(1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 31.6, 60.0cm/s)を、付随運動知覚閾値に対しては8種類の頭部運動速度条件(0.125, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 16.0, 60.0cm/s)を用いた。従って、被験者全員がこの条件で観察を行ったわけではない。刺激は、Ujike & Ono (2001)で用いられたものと同様で、4段の正弦波状の帯(各20周期)から成り、1, 3段目の組、2, 4段目の組が同方向に動き、それぞれの組は逆方向に動いた。また頭部運動距離は30cmであり、被験者はロッドの上に頭部を置いた。運動の最初と最後の5

cmは、ロッドがそれぞれ加速と減速をし、中央の20cmの間は一定に動いた。刺激はロッドが一定に動いている間だけ表示された。また、頭部運動速度に対する相対画像速度の比率の調節を手でノブを操作することにより行った。被験者の課題は、奥行きまたは付随運動が知覚されなくなるまでノブを調節することによって相対画像速度の比率、即ち等価視差を調節することであった。観察は単眼で行われ、奥行き知覚閾値、付随運動知覚閾値条件の両方の実験セッションを通して、それぞれ頭部運動速度に対して20試行が行われた。

2つ目の実験の目的は、ある頭部運動速度に対する見掛け上の奥行きを、他の頭部運動速度で知覚された奥行きにマッチングさせることであった。この実験では、2組の運動視差刺激を用意し、標準刺激とテスト刺激から成った。1つ目は標準刺激であり、これは頭部運動速度一定(16.0cm/s)で提示され、4種類の等価視差(1.3, 2.5, 5.1, 10.1min)のうちのどれかで固定された。2つ目はテスト刺激であり、7種類の頭部運動速度(1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 1.6, 60.0cm/s)のうちのどれかで頭部を運動させながら課題を行った。被験者は、まず頭部運動3周期の間標準刺激のうちの1つを観察し、その後でテスト刺激を観察した。被験者の課題は、テスト刺激の奥行き量が標準刺激によって知覚された奥行き量と同等になるまで、等価視差を調節することであった。観察は単眼で行われた。

この2つの実験の結果、奥行き知覚閾値を付随運動知覚閾値の間の領域が視覚的に安定な領域であり、この領域は頭部運動速度が速い場合に広くなり、頭部運動速度と運動視差に依存した。ある運動視差で提示された奥行きを知覚するために、頭部運動速度が遅い場合は、速い場合よりも大きな運動視差量を必要とした。また、運動視差について、奥行きシステムが最大の効率を達成するためには、10-15cm/s以上の頭部運動速度を必要とすることが示された。

上記2つの結果から、付随運動閾値上で奥行き知覚が起こるかどうかは明確ではない。3つ目の実験では、頭部運動速度が16.0cm/sの場合に運動視差(± 1.67 , ± 3.34 , ± 6.67 , ± 13.3 , ± 26.7 , ± 53.4 , ± 107 , ± 213 , 0.0min)を変えて、知覚された奥行き量を測定した。1セッション内に17種類の運動視差が1つずつ提示され、全3セッション、合計51試行が行われた。被験者は提示された刺激に対して、奥行きと運動、または奥行きか運動が観察されるかどうかを報告した。もし奥行きが知覚されたなら、カリパスの開き角を調節することによって、知覚された奥行きを報告した(Ono, Rivest & Ono, 1986; Ichikawa, Nishida & Ono, 2004)。観察は単眼で行われた。なお刺激の提示時間に制限は無かった。この結果、知覚された奥行きは、最大で約10-20minまでは等価視差の絶対的な値として増加した。これ以上の等価視差に関して、奥行きは減少し、付随運動が見られた。また等価視差が大きい場合は付随運動のみが知覚された。

以上より、Ono & Ujikeは、(1)奥行き知覚閾値と付随運動閾値の間の領域では付随運動は見られず、奥行きのみが知覚される。即ち、この領域は頭部運動によって作り出される網膜像運動に関わらず、知覚は安定である、(2)頭部運動速度が遅い場合(13.0cm/s以下)、頭部運動速度が速い場合(13.0cm/s以上)に知覚された奥行きと同じ奥行きをマッチングするため

に、より大きな運動視差を要する、(3) 運動視差が小さいとき付随運動を知覚せず、運動視差が大きくなるにつれて知覚された奥行き量は減少し、付随運動が増加する。このとき知覚された奥行き量と付随運動量の間にはトレードオフがある。運動視差を大きくすると、奥行きが見られず、付随運動のみが見られるようになる、と結論付けた。

3. 実験

3.1. 実験1

3.1.1. 目的

Rogers & Graham (1979) は、自己運動及び対象運動に基づく運動視差が、それ以外の奥行きに関する手掛かりを欠いた状態でも、奥行きを知覚するための手掛かりになることを示した。その後、Ono & Steinbach (1990) の研究により、自己運動であるか対象運動であるかで、知覚された奥行きに明らかな差異があることが示された。一方で、渡辺・一川 (2001a) は、知覚された奥行きに関して自己運動と対象運動における差異は無いとした。さらに、渡辺・一川 (2001b) は、日常場面での運動視差からの奥行き知覚過程を理解するためには、被験者の運動を制約しない、自由な状態で実験をすることが望ましいとし、Rogers & Graham (1979, 1982) などで用いられた被験者の頭部の運動を制御するためのガイドを用いずに実験を行った。このように、自己運動と対象運動の比較が行われ、さらに自己運動に基づく運動視差についての研究が多い中、観察者が静止し、対象が動いているような対象運動に基づく運動視差も、日常場面において多く考えられる。また、運動視差は両眼視差と同様に、奥行き知覚のための手掛かりになるとされているが、運動視差によって奥行き感が得られるのは、その物体間の相対速度が手掛かりとなっているのではないか、この疑問を解決するために、実験1が設計された。

実験1では、対象運動に基づく運動視差により立体的な面が知覚されるランダムドットパターンを用い、刺激の形状(相対速度)を変化させた。被験者の課題は、(1) 提示された刺激が連続に見えるか不連続に見えるかを報告し、(2) そのときに知覚された奥行き量を長さで答えることであった。なお、運動視差の大きさを表すために等価視差(Rogers & Graham, 1979, 1982; Ono, Rivest & Ono, 1986)を用いて換算した。

3.1.2. 方法

[被験者]

著者の1名(SA)を含む女性7名と男性1名が実験に参加した。被験者は19-27歳(平均年齢22.9歳)で、裸眼・矯正視力が0.8以上である。SAを除いて、被験者は実験の目的を知らない。

[装置]

Dell Precision PWS470を用いて刺激を生成した。刺激はリフレッシュレート75Hzの21インチCRTモニターに表示された。モニターの解像度は1600×1200である。実験参加者とディスプレイの間の距離は約100cm、刺激に用いたランダムドットパタンの表示領域は12.5cm×12.5cmであり、視角7.13deg×7.13degに相当する。ディスプレイの平均輝度は、画面を直接見た場合は約2.70cd/m²であり、立体視鏡を通して見た場合は約2.93cd/m²であった。なお、実験は暗室で行った。

[刺激]

刺激として、奥行き方向がX方向に一定で、Y方向に変化するランダムドット相対運動刺激を用いた。但し、相対速度（刺激の不連続性）が段階的に操作されており、4条件（矩形波2段、矩形波6段、矩形波10段、正弦波）が設定された。運動視差は0.40degに固定した。刺激パタンの運動方向は、上半分が被験者から画面に向かって右方向であり、下半分が左方向であった。運動開始時及び終了時に余弦関数状に速度が増減し、それ以外では一定速度で移動する。刺激のドット密度は約9.11ドット/deg²（ドット数：500）であり、空間周波数は約0.14c/deg、ドットの大きさは全ての点で一定（1ピクセル）である。

[手続き]

試行が開始されると、最初にディスプレイには、刺激が提示される領域と注視点を示した図形が表示される。キー操作によって、運動視差により奥行きを知覚出来る刺激（ランダムドットパターン）が提示される。この刺激の提示時間は約2秒間であり、その後空白が約2秒間提示される。この刺激提示と空白が刺激の形状1種類につき3回繰り返される。3回目の空白は2秒以上続き、このときに被験者は刺激の評定を行うように指示された。試行回数は12試行であり、1試行中に4種類の刺激がランダムに提示される。なお、3試行毎に2分間の休憩をとった。また、被験者は単眼（利き目）で刺激を観察した。

[課題]

被験者の課題は、知覚された面が連続または不連続のどちらに見えるかを報告し、その奥行き量を評定することであった。なお、奥行き量の評定は、知覚された面の最大振幅を紙に記録することにより、長さで答えた。

3.1.3. 結果

実験結果を図3に、知覚された面の形状の各割合を図4に、各被験者の評定値の平均値を表1に示す。図3は刺激の形状と知覚された刺激の奥行き量の関係であり、図4は被験者が提示された各刺激をどのように知覚したかの各割合である。図3、4における横軸は刺激の形状を

表す。図3における縦軸は被験者毎の知覚された奥行き量の評定値の平均値を表し、正弦波を1として規格化されている。

矩形波2段を除き、被験者全員が対象運動による運動視差から奥行きを知覚することが出来た。また、個人差はあるが、知覚された奥行き量は正弦波が最も大きく、矩形波の分割数が減少する（相対速度が増加する）と共に減少する傾向にあった。矩形波2段に関しては、被験者2名は奥行きを知覚することが出来ず、4名は知覚出来ないときもあった。奥行きを知覚出来なかったとき、刺激は同一平面状を動くドットの集合として知覚された。

知覚された面の形状は、矩形波2段、6段が提示されたときに不連続的に知覚される傾向にあり、矩形波10段、正弦波が提示されたときに連続的に知覚される傾向にあった。また、被験者全員が刺激の下半分を手前に、上半分を奥に知覚する傾向にあった。このことについては、視野内の下方にある対象が上方にある対象より近くに見える傾向、即ち、“相対的な高さ (relative height)” の手掛かりに基づくものであると考えられる (Rock, 1975)。

さらに、1元配置分散分析を行った結果、刺激の形状間に有意な差が見られた [$F(3, 28) = 29.69, p < 0.01$]。多重比較の結果、矩形波2段と矩形波6段、矩形波2段と矩形波10段、矩形波2段と正弦波それぞれの平均値間に有意差があった (いずれも $p < 0.01$)。矩形波2段と他の形状との差は、奥行きを知覚出来たか否かに起因すると考えられる。

以上より、提示した刺激の運動視差自体は全て同じであるにも関わらず、刺激の形状によって奥行き量に違いが生じた。これは、運動視差により奥行き感を得ているのではなく、相対速度により奥行きを知覚していることを示唆しているのではないかと考えられる。しかしながら、運動視差によって刺激を提示した場合、相対速度の減少と共に面を連続的に知覚する割合が増加し、それと共に奥行き量も増加している。これは、相対速度が面の連続性にも影響を及ぼし、不連続を検出するということが、奥行き量が減少する要因の1つになるのではないとも考えられる。この仮定に基づき、実験2は設計された。

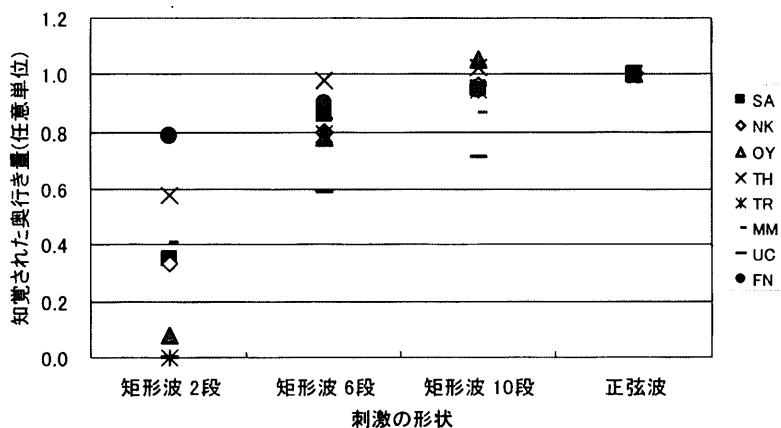


図3 刺激の形状と知覚された奥行き量の関係。横軸は刺激の形状を、縦軸は各被験者が知覚した奥行き量の平均値を表している。なお、奥行き量は規格化されている。

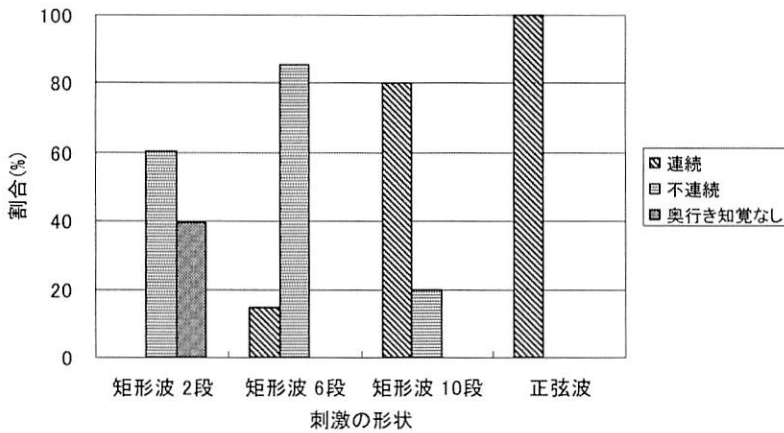


図4 知覚された面の形状の割合. 横軸は刺激の形状を, 縦軸は各刺激がどのように知覚されたかの割合を表している.

表1 各被験者が知覚した奥行き量の平均値. なお各値は平均した後に, 正弦波を1として規格化されている.

	SA	NK	OY	TH	TR	MM	UC	FN
矩形波 2段	0.35	0.33	0.08	0.57	0.00	0.41	0.00	0.79
矩形波 6段	0.86	0.80	0.78	0.98	0.79	0.84	0.59	0.90
矩形波10段	0.95	0.96	1.05	1.02	0.94	0.86	0.71	0.94
正 弦 波	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.2. 実験2

3.2.1. 目的

実験1において, 正弦波及び相対速度(刺激の不連続性)を変えた矩形波を形成し, 物体間の相対速度により奥行き感を得ているかどうかを調査し, 刺激の形状が面の知覚(連続/不連続)に及ぼす影響と, そのときに知覚された奥行き量を調べた. その結果, 運動視差自体は全て同じであるにも関わらず, 刺激の形状により奥行き量に違いが生じ, 相対速度により奥行きを知覚していることが示唆された. しかしながら, 面を連続的に知覚する割合が増加すると共に奥行き量も増加していることから, 不連続検出が奥行き量減少の要因になるのではないかと考えられる.

実験2では, 実験1を踏まえ, 面の相対速度を固定し, ドット密度を変化させることにより, 刺激の連続性と奥行き量を評価した. 実験1において不連続的に知覚される傾向にあった矩形波6段を用い, ドット密度の変化により知覚された面の連続性が変化し, さらにそれに伴い奥行き量も変化するのであれば, 面の連続性が運動視差によって奥行きを知覚する要因となり, ドット密度は面の連続性を決める要因になることになる.

3.2.2. 方法

[被験者及び装置]

被験者及び装置は、実験1と同じである。

[刺激]

実験1で用いた矩形波6段の刺激を、ドット密度を変えて使用した。ドット密度（ドット数）は4条件（2.28（125）、4.57（250）、13.70（750）、18.26（1000）ドット/deg²）が設定された。

[手続き及び課題]

手続き及び課題は、実験1と同じである。

3.2.3. 結果

実験結果を図5, 6に、知覚された面の形状の各割合を図7に、各被験者の評定値の平均値を表2に示す。図5, 6はドット密度と知覚された刺激の奥行き量の関係であり、図7は被験者が提示された各刺激をどのように知覚したかの割合である。図5-7における横軸はドット密度を表す。図5, 6における縦軸は被験者毎の知覚された奥行き量の評定値の平均値を表し、ドット密度2.28ドット/deg²を1として規格化されている。

被験者全員が対象運動による運動視差から奥行きを知覚することが出来た。知覚された面の形状は、ドット密度2.28ドット/deg²のときに連続に知覚される傾向にあったが、ドット密度の増加と共に不連続に知覚される割合が増加し、18.26ドット/deg²のときにはほぼ不連続的に知覚された。知覚された奥行き量には個人差があり、2種類の傾向に分けられた。被験者8名中4名はドット密度に関わらず奥行き量をほぼ一定に知覚し、残りの4名に関してはドット密度の増加と共に奥行き量が減少した。

1元配置分散分析を行った結果、ドット密度間に有意な差は見られなかった [F(3, 28) = 0.098, n.s.]。しかし、ドット密度の増加と共に奥行き量が減少した被験者に対して1元配置分散分析を行った結果、ドット密度間に有意な差が見られた [F(3, 12) = 13.75, p < 0.001]。多重比較の結果、2.28ドット/deg²と13.70ドット/deg²、2.28ドット/deg²と18.26ドット/deg²、4.57ドット/deg²と13.70ドット/deg²、4.57ドット/deg²と18.26ドット/deg²の平均値間に有意差があった (4.57ドット/deg²と13.70ドット/deg², p < 0.05; それ以外, p < 0.01)。この差は知覚された面の連続性に起因すると考えられる。

以上より、知覚された奥行き量がほぼ一定であった被験者は剛体性の仮定に基づいて面を知覚しており、奥行き量が減少した被験者については面を連続に知覚したときよりも面を不連続に知覚したときのほうが、奥行き量を少なく見積もる傾向にあったので、この被験者に関しては、不連続を検出した際に、奥行き量が減少することが考えられる。しかしながら、面の連続性が奥行き量、ひいては奥行き知覚に影響を及ぼすかどうかを明らかにすることは出来なかつ

た。実験1において不連続的に知覚される傾向にあった矩形波6段で相対速度を固定し、ドット密度を変えることにより面の連続性の知覚に影響を与えることが可能であったため、面の連続性も運動視差による奥行き知覚に何らかの影響を及ぼしている可能性は考えられる。

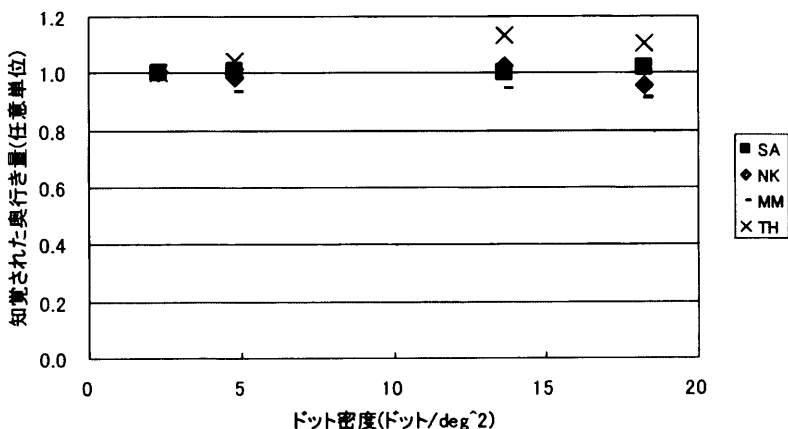


図5 ドット密度によらず奥行き量が一定であった被験者のドット密度と知覚された奥行き量の関係。横軸はドット密度を、縦軸は各被験者が知覚した奥行き量の平均値を表している。なお、奥行き量は規格化されている。

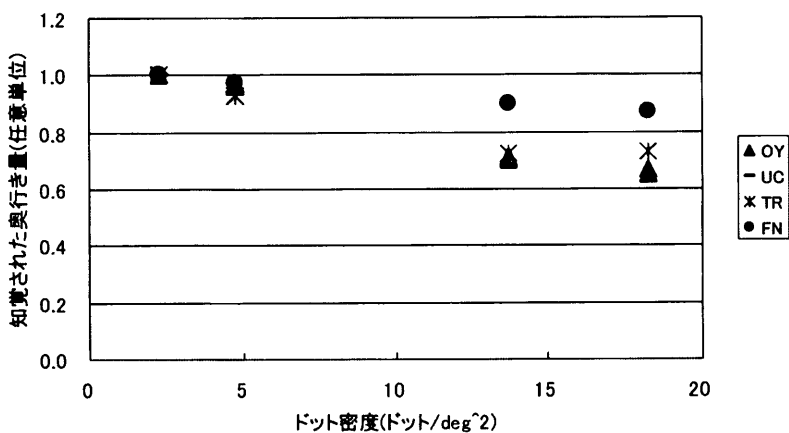


図6 ドット密度の増加と共に奥行き量が減少した被験者のドット密度と知覚された奥行き量の関係。横軸は刺激の形状を、縦軸は各被験者が知覚した奥行き量の平均値を表している。なお、奥行き量は規格化されている。

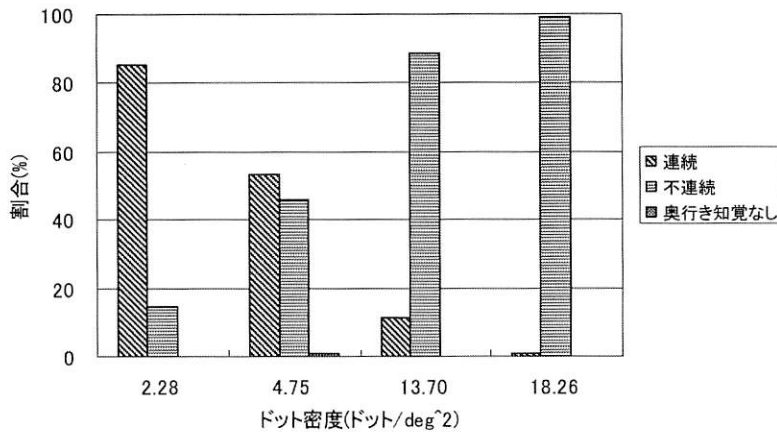


図7 知覚された面の形状の割合. 横軸はドット密度を, 縦軸は各刺激がどのように知覚されたかの割合を表している.

表2 各被験者が知覚した奥行き量の平均値. なお各値は平均した後に, ドット密度2.28ドット/deg²を1として規格化されている.

	SA	NK	MM	TH	OY	UC	TR	FN
2.28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.75	1.01	0.98	0.93	1.04	0.96	0.94	0.93	0.97
13.70	1.00	1.02	0.95	1.13	0.71	0.67	0.73	0.90
18.26	1.02	0.96	0.91	1.11	0.67	0.62	0.73	0.87

3.3. 実験3

3.3.1. 目的

実験2の結果からは, 面の連続性が奥行き知覚の手掛かりになるかどうかを明らかにすることが出来なかったが, ドット密度が面の連続性へ影響を及ぼすことは明らかである. 実験3では, 相対速度とドット密度のどちらがより面の連続性に影響を及ぼすかを調査するために設計された. どちらがより影響を及ぼすかが明らかに出来れば, そちらがより奥行き知覚に影響を及ぼすと考えられる.

そこで, 実験1, 2において1周期であった刺激を半周期にし, ドット密度は実験1と同様にして, 知覚された面の形状と奥行き量を調べ, 実験1, 2の結果と比較した. 刺激の周期を半周期にすることにより, 相対速度は同じであるが矩形の幅が違うという条件下で比較することが出来る.

3.3.2. 方法

[被験者]

著者の1名(SA)を含む女性7名と男性3名が実験に参加した。被験者は20-28歳(平均年齢22.4歳)で、裸眼・矯正視力が0.8以上ある。SAを除いて、被験者は実験の目的を知らない。

[装置]

装置は、実験1と同じである。

[刺激]

刺激として、奥行き方向がX方向に一定で、Y方向に変化するランダムドット相対運動刺激を用いた。但し、相対速度(刺激の不連続性)が段階的に操作されており、5条件(矩形波2段、矩形波3段、矩形波4段、矩形波6段、正弦波)が設定された。運動視差は0.40degに固定した。刺激パタンの運動方向は、被験者から画面に向かって左方向であった。運動開始時及び終了時に余弦関数状に速度が増減し、それ以外では一定速度で移動する。刺激のドット密度は約9.11ドット/deg²(ドット数:500)であり、空間周波数は約0.07c/deg、ドットの大きさは全ての点で一定(1ピクセル)である。

[手続き及び課題]

手続き及び課題は、実験1と同じである。

3.3.3. 結果

実験結果を図8に、知覚された面の形状の各割合を図9に、各被験者の評定値の平均値を表3に示す。図8は刺激の形状と知覚された刺激の奥行き量の関係であり、図9は被験者が提示された各刺激をどのように知覚したかの割合である。図8における横軸は刺激の形状を表し、図8、9における縦軸は被験者毎の知覚された奥行き量の評定値の平均値を表し、正弦波を1として規格化されている。

矩形波2段を除き、被験者全員が対象運動による運動視差から奥行きを知覚することが出来た。また、個人差はあるが、知覚された奥行き量は正弦波が最も大きく、矩形波の分割数が減少すると共に減少する傾向にあった。矩形波2段に関しては、被験者2名は奥行きを知覚することが出来ず、2名は知覚出来ないときもあった。奥行きを知覚出来なかったとき、刺激は同一平面上を動くドットの集合として知覚された。

知覚された面の形状は、矩形波2段、3段が提示されたときに不連続的に知覚される傾向にあり、相対速度の減少と共に連続的に知覚される割合が増加した。半周期の矩形波6段の相対速度は0.43mm/sであり、これは1周期の矩形波10段と同じである。また、半周期の矩形波4段の相対速度は0.72mm/sであり、1周期の矩形波6段と同じである。実験1及び3より、前

者は連続的に知覚される傾向にあり，後者は不連続的に知覚される傾向にあった。

1元配置分散分析を行った結果，刺激の形状間に有意な差が見られた [$F(4, 45) = 19.51, p < 0.01$]。多重比較の結果，矩形波2段と矩形波3段，矩形波2段と矩形波4段，矩形波2段と矩形波6段，矩形波2段と正弦波，矩形波3段と矩形波6段，矩形波3段と正弦波の平均値間に有意差があった（矩形波3段と矩形波6段， $p < 0.05$ ；それ以外， $p < 0.01$ ）。矩形波2段と他の形状との差は，奥行きを知覚出来たか否かに，矩形波3段と6段及び正弦波との差は，知覚された面の連続性に起因すると考えられる。

ドット密度が9.11ドット/deg²であり，1周期で不連続に知覚される傾向にあった矩形波6

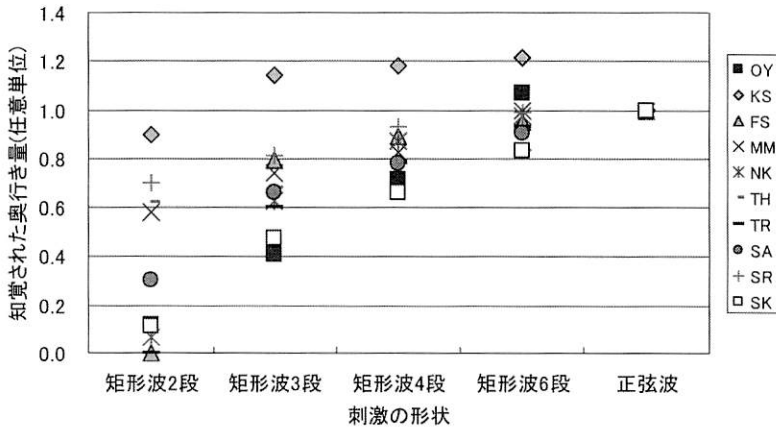


図8 刺激の形状と知覚された奥行き量の関係。横軸は刺激の形状を，縦軸は各被験者が知覚した奥行き量の平均値を表している。なお，奥行き量は規格化されている。

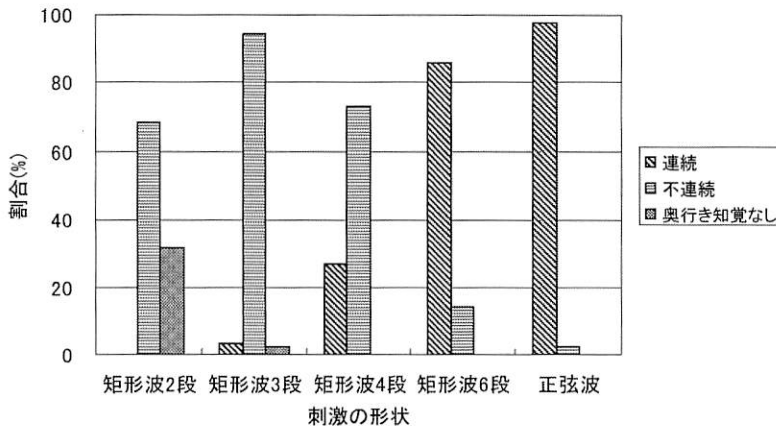


図9 知覚された面の形状の割合。横軸は刺激の形状を，縦軸は各刺激がどのように知覚されたかの割合を表している。

表3 各被験者が知覚した奥行き量の平均値。なお各値は平均した後に、正弦波を1として規格化されている。

	OY	KS	FS	MM	NK	TH	TR	SA	SR	SK
矩形波 2 段	0.12	0.90	0.00	0.58	0.07	0.62	0.00	0.30	0.70	0.11
矩形波 3 段	0.41	1.14	0.79	0.74	0.63	0.68	0.60	0.66	0.81	0.48
矩形波 4 段	0.72	1.18	0.89	0.83	0.87	0.78	0.78	0.78	0.93	0.66
矩形波 6 段	1.07	1.22	0.95	1.00	0.98	0.83	0.93	0.91	0.99	0.83
正 弦 波	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

段が（実験1）、半周期で連続的に知覚される傾向にある。また、実験1及び3において、矩形波の幅が狭くなると共に連続的に知覚される傾向にある。従って、面の連続性に及ぼす影響は、ドット密度の影響よりも相対速度の影響のほうが強いと考えられる。知覚された奥行き量は、実験1と同様に相対速度の減少と共に増加した。よって、知覚された奥行き量は相対速度の減少に伴い、増加する傾向にあることが分かった。

以上より、奥行き知覚に対する影響は、ドット密度より相対速度のほうが強いことが示唆され、これは矢張り実験1の結果から考えられたように、運動視差により奥行き感を得ているのではなく、相対速度により奥行きを知覚していることを示唆しているのではないかと考えられる。しかしながら、知覚された面の形状が、知覚された奥行き量に影響を及ぼすか否かは明確ではなく、このことに関しては今後検討を重ねる必要がある。

3.4. 考察

本実験の目的は、対象運動下において運動視差自体が両眼視差と同様に奥行き知覚の手掛かりとなるかどうかを調査することであった。一連の実験より、刺激の形状について運動視差自体は全て同じであり、刺激の形状によって奥行き量に違いが出た。これは運動視差により奥行き感を得ているのではなく、相対速度によって奥行きを知覚しているのではないかと考えられる。さらに、知覚された面の連続性が奥行き量に直接影響を及ぼすかどうかは明らかにすることが出来なかったが、実験結果より、相対速度とドット密度では、相対速度のほうが面の連続性により強く影響を及ぼすことが示唆された。

ところで実験1、3において、運動視差によって矩形波2段を提示した場合に、奥行きが曖昧になったり、奥行きを知覚することが困難になったりする現象が起こった。予備実験において、両眼視差によって、実験1、3における矩形波2段と同等の刺激を、実験3と同じ被験者が同等の条件で観察した。その結果、運動視差によって面を知覚する本実験とは違い、被験者全員が奥行きを知覚することが出来た。即ち、両眼視差による面の知覚は運動視差の場合と違い、より安定であると言える。それでは何故このような現象が起こったのであろうか。

人間の視覚は、特徴点やエッジの情報をを用いてその周囲を補間（充填）している。RDSを

融合させることにより面を知覚した際に、もともと図に描かれているのはランダムな点列のみであるにも関わらず、我々は1つの面を知覚している。即ち、点列が無い部分を補間することにより、孤立した点の集合としてではなく、奥行きのある面として知覚しているのである。White (1962) によって、人間は2-3%程度の低密度のRDSさえも面として知覚出来ることが報告されている。また、これを示した日常的な例は、網膜上の血管や盲点の部分を通常意識していないことである。これらは相対的に静止しているので、補間して外界の情報によりこれらの部分を埋めなければ、視野が欠けてしまうことになる。

矩形波2段の刺激には境界領域が1つしかないため奥行きを知覚することが困難になるのではないかと考えられる。内観報告により、被験者はこの刺激を上下に分かれた2枚の帯状のものとして知覚しているので、面の補間も行われている。しかしながら、上の矩形には上方からの、下の矩形には下方からの補間が行われない。特に、実験3において、矩形波3段の刺激では被験者2名が各1回だけ奥行きを知覚出来なかったが、それ以外では奥行きを知覚することが出来ている。矩形波3段では、中央の矩形領域の上下に、境界領域としてのエッジ情報があるので、それを用いて補間が行われており、矩形の枚数がそれ以上になった刺激に対しても、同様のことが考えられる。即ち、運動視差により奥行きを知覚するためには、最低でも3個の速度勾配を持った物体の情報が必要となることが示唆される。また、矩形波2段に奥行きを知覚出来る場合、対象の空間形状に関する仮定や先験的な知識が用いられているためであると考えられる。さらに、速度のパリエーションが少ない刺激の場合に、その方向に関しては曖昧になるという報告もあり、その可能性も考えられる (Kaneko & Uchikawa, 1993)。

4. おわりに

本稿では、視覚情報を処理するための様々な奥行き手掛かりの要因のうちで、特に運動視差に基づく単眼立体視に注目し、この運動視差からの奥行き知覚についての考察を行った。運動視差に関する代表的な研究、及び観察者及び対象の運動による奥行き知覚について幾何学的な面とそれらの研究を概観した。さらに、対象移動に基づく運動視差により、刺激として提示した物体間の相対速度が奥行き知覚の手掛かりとなっていることを実験により示した。

Wheatstone (1838) や Helmholtz (1866 / 1925) によって運動視差が奥行き知覚の有効な情報源となることが示され、さらに Rogers & Graham (1979) が被験者頭部とランダムドットボタンを連動させて動かす方法を提案してから、運動視差に関する様々な知識が得られてきた。しかしながら、観察者運動視差、対象運動視差、さらに観察者・対象運動視差の知覚の結果に対する違いや、両眼視差と運動視差の違いに関する問題など、運動視差に関する様々な課題が残っている。

今後は、観察者の運動と連動しない対象の運動が奥行きの知覚に及ぼす影響、奥行き形成のための時間的影響にも焦点を当てる必要がある。さらに、本稿で行った実験については、対象

の空間形状に関する知識, ここでは剛体性の仮定の影響も考えられ, 相対速度, 面の補間, 剛体性の仮定の相互作用を考慮した検討も必要である.

参考文献

- [1] Anstis, S. M., Howard, I. P. & Rogers, B. J.: A Craik - Cornsweet illusion for visual depth, *Vision Research*, 18, 213-217 (1978).
- [2] Braunstein, M. L.: Sensitivity of the observer to transformations of the visual field, *Journal of Experimental Psychology*, 72, 683-689 (1966).
- [3] Braunstein, M. L.: Motion and texture as sources of slant information, *Journal of Experimental Psychology*, 78, 247-253 (1968).
- [4] Braunstein, M. L.: *Depth Perception through Motion*, New York: Academic Press (1976).
- [5] Campbell, F. W. & Robson, J. G.: Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, *Journal of Physiology*, 197, 551-566 (1968).
- [6] Gibson, J. J.: *The Perception of the Visual World*, Boston: Houghton Mifflin (1950).
- [7] Gibson, J. J.: *The Senses Considered as Perceptual Systems*, London: George Allen and Unwin (1966).
- [8] Gogel, W. C.: A theory of phenomenal geometry and its implications, *Perception & Psychophysics*, 48, 105-123 (1990).
- [9] Graham, M. E. & Rogers, B. J.: Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information, *Perception*, 54, 223-239 (1982).
- [10] 林武文・本郷節之・曾根原登: 第7章 視覚の計算論モデル, 臼井支朗 (編): 脳・神経システムの数理モデル——視覚系を中心に, 共立出版, 126-142 (1997).
- [11] Heine, L.: Über Wahrnehmung und Vorstellung von Entfernungsunterschieden, *Albrecht von Graefe's Archiv für Klinische und Experimentelle Ophthalmologie*, 61, 484-498 (1905).
- [12] Helmholtz, H.: *Helmholtz's treatises on physiological optics. vol. 3.*, In J. P. C. Southall (ed. & trans.), New York: Dover (1866 / 1925).
- [13] Howard, I. P & Rogers, B. J.: *Depth Perception: Seeing in Depth. vol. 2.*, I Porteous (2002).
- [14] 一川誠: 運動視差からの奥行き知覚研究の動向, *VISION*, 9, 125-130 (1997).
- [15] Ichikawa, M., Nishida, S. & Ono, H.: Depth perception from second-order-motion stimuli yoked to head movement, *Vision Research*, 24, 2945-2954 (2004).
- [16] 乾敏郎: Q&Aでわかる脳と視覚——人間からロボットまで——, サイエンス社 (1993).
- [17] Julesz, B.: Binocular depth perception of computer-generated pattern, *Bell System Technical Journal*, 39, 1125-1162 (1960).
- [18] 金子寛彦: 4. 立体・奥行きの知覚の手がかり, 塩入論 (編): 講座〈感覚・知覚の科学〉2 視覚Ⅱ——視覚系の中期・高次機能——, 朝倉書店, 67-99 (2007).
- [19] Kaneko, H. & Uchikawa, K.: Apparent relative size and depth of moving objects, *Perception*, 22, 537-547 (1993).
- [20] Marr, D.: *Vision, A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, San Francisco: W. H. Freeman and Company (1982).
- [21] 中溝幸夫・斎田真也: 運動視差: 研究史と最近の研究動向, *福岡教育大学紀要*, 39, 239-264 (1990).
- [22] 近江政雄: 7. 奥行き (立体) 視, 7.5 運動視差に基づく立体視, 日本視覚学会 (編): 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, 321-325 (2000).

- [23] Ono, M. E., Rivest, J. & Ono, H.: Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information, *Journal of Experimental Psychology*, 12, 331-337 (1986).
- [24] Ono, H., Sato, T., Shioiri, S. & Ujike, H.: An aftereffect of William Dember in motion: Probing the signal for motion parallax, In R. R. Hoffman, M. F. Sherrick & J. S. Warm (eds.), *Viewing psychology as a whole*, Washington, DC: APA (1998).
- [25] Ono, H. & Steinbach, M. J.: Monocular stereopsis with and without head movement, *Perception & Psychophysics*, 48, 179-187 (1990).
- [26] Ono, H. & Ujike, H.: Apparent depth with motion aftereffect and head movement, *Perception*, 23, 1241-1248 (1994).
- [27] Ono, H. & Ujike, H.: Motion parallax driven by head movements: Conditions for visual stability, perceived depth, and perceived concomitant motion, *Perception*, 34, 477-490 (2005).
- [28] Ono, H. & Wade, N. J.: Depth and motion in historical descriptions of motion parallax, *Perception*, 34, 1263-1273 (2005).
- [29] Richards, W.: Stereopsis and stereoblindness, *Experimental Brain Research*, 10, 380-388 (1970).
- [30] Rock, I.: *An Introduction to Perception*, New York: Macmillan (1975).
- [31] Rogers, B. J. & Collett, T. S.: The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41 (A), 697-717 (1989).
- [32] Rogers, B. J. & Graham, M.: Motion parallax as an independent cue for depth perception, *Perception*, 8, 125-134 (1979).
- [33] Rogers, B. J. & Graham, M. E.: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception, *Vision Research*, 22, 261-270 (1982).
- [34] Rogers, B. J. & Graham, M. E.: Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces, *Science*, 221, 1409-1411 (1983).
- [35] Schumer, R. & Ganz, L.: Independent stereoscopic channels for different extents of spatial pooling, *Vision Research*, 19, 1303-1314 (1979).
- [36] Steinbach, M. J., Ono, H. & Wolf, M.: Motion parallax judgments of depth as function of the direction and type of head movement, *Canadian Journal of Psychology*, 45, 92-98 (1991).
- [37] Tyler, C. W.: Depth perception in disparity gratings, *Nature*, 251, 140-142 (1974).
- [38] Tyler, C. W.: Spatial organization of binocular disparity sensitivity, *Vision Research*, 15, 583-590 (1975).
- [39] Tyler, C. W.: Cyclopean vision, In D. Regan (ed.), *Binocular Vision*, CRT Press, 38-74 (1991).
- [40] 氏家弘裕: 立体視 奥行きてがかりとしての両眼網膜像差および運動視差, *VISION*, 7, 9-16 (1995).
- [41] Ujike, H. & Ono, H.: Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity, *Vision Research*, 41, 2835-2843 (2001).
- [42] Wallach, H.: Perceiving a stable environment, *Scientific American*, 252, 118-124 (1985).
- [43] Wallach, H. & O'Connell, D. N.: The kinetic depth effect, *Journal of Experimental Psychology*, 45, 205-217 (1953).
- [44] 渡辺広明・一川誠: 運動視差からの奥行知覚の感度と頭部もしくは刺激の運動速度, *VISION*, 13, 33-36 (2001a).
- [45] 渡辺広明・一川誠: 頭部運動に制約がない場合の運動視差からの奥行知覚, *VISION*, 13, 241-

244 (2001b).

- [46] Wheatstone, C.: On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 128, 371-394 (1838).
- [47] White, B. W.: Stimulus-conditions affecting a recently discovered stereoscopic effect, *The American Journal of Psychology*, 75, 303-306 (1962).