

運動視差による簡単な刺激の奥行き知覚

近江 政雄・Hiroshi Ono

ヨーク大学 心理学科 視覚研究センター
カナダ オンタリオ州ノースヨーク

(1993年 9月28日受付, 1993年10月29日改訂受付, 1993年11月 9日受理)

Depth Perception of Simple Stimuli by Motion Parallax

Masao OHMI and Hiroshi ONO

Centre for Vision Research, Department of Psychology, York University
4700 Keele Street, North York, Ontario M3J 1P3, Canada

(Received 28 September 1993; revised form received 29 October 1993; accepted 9 November 1993)

We investigated the accuracy and the precision of motion parallax information for depth perception of simple-object stimuli. When depth varied on the horizontal direction, the accuracy of motion parallax for perceived depth of the simple-object stimuli was not significantly different from the accuracy for the random-dot-pattern stimuli. When depth varied on the vertical direction, the bottom part of the simple-object stimulus tended to be perceived closer. However, when the perceived depth relationship was correct, the accuracy of perceived depth of the simple-object stimuli was not significantly different from that of the random-dot-pattern stimuli. The precision did not change significantly for the simple-object stimuli and for the random-dot-pattern stimuli. These results proved experimentally that motion parallax information was useful for depth perception even for simple-object stimuli.

1. はじめに

われわれが頭を動かすと物体の像は網膜上を動くが、その運動の大きさと方向は物体までの距離によって異なり、これを運動視差という。静止した二つの物体が異なった距離にあり、それらの中間を固視しながら、頭を左右に動かしたとしよう。このとき図1に示すように物体A・Bの像は網膜上を運動するが、固視点Fよりも近くにある物体Aの知覚される運動方向は頭の運動と逆方向であり、固視点Fよりも遠くにある物体Bの知覚される運動方向は頭の運動と同方向である。また、それらの網膜像の運動の大きさは物体A・Bが固視点Fに近づくほど小さくなる。眼から固視点Fまでの距離D、頭の

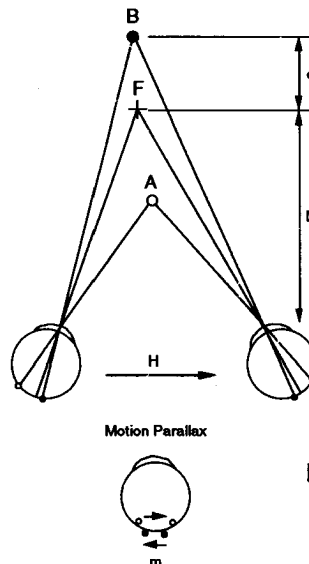


図1 運動視差による奥行き知覚の原理

移動量 H 、視角で測った網膜像の移動量 m と、固視点と物体の間の奥行き d の間には式 (1) に示す関係がある。

$$d = D^2 (m/H) \quad (1)$$

式 (1) は、頭の移動量と物体の網膜像の移動量との比と固視点までの距離を知ることによって固視点と物体の間の距離を知り得ること、すなわち運動視差情報を使って物体間の奥行きが知覚できることの幾何学的基礎を与える。もちろん、ある知覚が幾何学的に可能であったとしても、それがわれわれの視覚系において実際に利用されているかどうかは、心理物理学の実験によって検証してみなくては分からない。運動視差情報が実際に奥行き知覚に使われていることを、始めて実験的に証明したのが Heine¹⁾ である。かれは異なった距離に二本の針を置き、それらを被験者の頭の運動に結合して、それぞれ反対の方向に運動させた。被験者が針を単眼で見たとき、実際にはより遠くにある針が、被験者の頭と逆方向に動くより近くにあるように観察された。この方法を更に発展させたのが Rogers and Graham²⁾ である。かれらは刺激として二次元のランダムドットパターンを呈示し、頭の運動に対応して三次元の静止した面に生じる相対運動をシミュレートするようにランダムドットパターンを変形させたときに、三次元表面が知覚される事を示した。その知覚が余りにも鮮やかであったためか、あたかも「運動視差情報は三次元表面の奥行きの知覚に対してのみ機能する」という暗黙の理解が存在するかのようになり、かれらの研究以来の運動視差による奥行き視の研究ではランダムドットパターンが刺激として用いられてきた³⁻⁸⁾。

しかしながら図 1 から明らかなように、運動視差情報を奥行き視に利用するためには、三次元表面であることは必要条件ではなく、二つの簡単な物体の間の奥行き知覚においても運動視差情報は利用できるはずである。ところがこのような刺激に対しては、運動視差情報によって異なった距離にある二つの簡単な物体間の奥行きが知覚される事を肯定する報告が

みられる^{1,9-11)} 一方で、奥行き知覚のあいまいさ¹⁰⁾ や他の情報による奥行き知覚の抑制^{9,11)} といった事実も示されており、二つの簡単な物体間の奥行き知覚に関して、運動視差情報が利用されない場合があることを示唆している。ただし、ここで注意しなくてはならないのは、これらの報告においては刺激として実際の三次元物体が使われていたことまた、Heine¹⁾ を除いては、刺激が空間に静止していて、被験者の頭の運動に結合して動かされていなかったために、運動視差以外の奥行き情報が実験結果に影響していた可能性があることである。したがって異なった距離にある簡単な物体の間の奥行きが運動視差情報によって決定されるのかどうかという基本的な疑問に対する明快な結論はいまだに下されていないといえる。

本報告はこの基本的な疑問を少し拡張して、視覚系が運動視差情報を使ってどの程度正確に簡単な物体間の奥行きを知覚することができるかを明らかにすることを目的とするものである。正確さの評価としては、二つの基本的測度、accuracy と precision がある。第一の accuracy は本報告の状況では呈示された奥行きの大きさと知覚された奥行きの大きさの間の誤差であり、第二の precision は本報告の状況では知覚された奥行きの大きさのばらつきである。ここではこれら二つの測度を用いて、運動視差情報による簡単な物体間の奥行きの知覚の正確さを評価した。運動視差以外の奥行き情報の介入を避けるために、刺激を二次元パターンとして呈示し、頭の運動に対応して実際の三次元物体に生じる相対運動をシミュレートするように二次元パターンを変形させた。ところで、三次元表面をシミュレートする様なランダムドットパターンと簡単な物体とは多くの面で異なっているが、ここでは二つの面に着目してそれらの奥行き知覚への影響について検討した。第一には、三次元表面においてはオブティカルフローが簡単な物体におけるものに比べてより豊かであることである。オブティカルフローが豊かであればあるほど、より確かな相対運動知覚がも

たらされ、そのためにより正確な奥行き知覚が得られると考えられる。第二には、三次元表面においては相対速度が連続的に変化するが、簡単な物体では相対速度の変化が急激なことである。Ono and Steinbach⁸⁾は相対速度が急激に変化するようなランダムドットパターンに対しては知覚される奥行きの大きさが減少することを報告しており、相対速度の変化が連続的である方がより正確な奥行き知覚が得られると考えられる。

本報告ではこれら二つの効果を検討するために、図2に示す四種類の刺激を採用した。第一の刺激(図2 a, b)は二つの点からなる二点刺激である。オプティカルフローが豊かではなく、相対速度も急激に変化する。この刺激は、

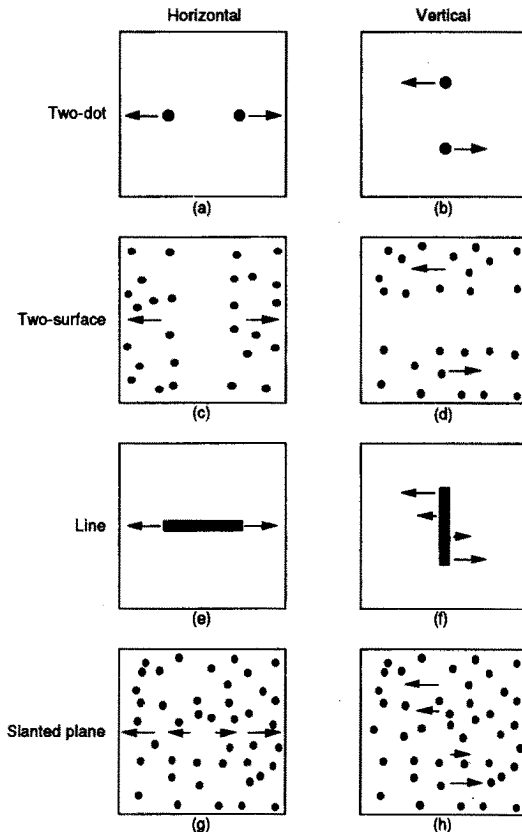


図2 本報告で用いた四種類の刺激。(a) 水平方向の二点刺激、(b) 垂直方向の二点刺激、(c) 水平方向の二平面刺激、(d) 垂直方向の二平面刺激、(e) 水平方向の線分刺激、(f) 垂直方向の線分刺激、(g) 水平方向の傾面刺激、(h) 垂直方向の傾面刺激。

二つの簡単な物体に相当する刺激と考えられる。第二の刺激(図2 c, d)は二つの異なる距離にある平面をシミュレートする様にランダムドットパターンによって構成された二平面刺激である。オプティカルフローは豊かであるが、二つの平面の間で相対速度が急激に変化する。第三の刺激(図2 e, f)は線分刺激である。相対速度は連続的に変化するが、オプティカルフローは豊かではない。第四の刺激(図2 g, h)は傾いた平面をシミュレートする様にランダムドットパターンによって構成された傾面刺激であり、オプティカルフローが豊かで、相対速度も連続的に変化する。この刺激は、従来から運動視差に関する研究に用いられている刺激に相当し、運動視差情報による奥行き知覚の正確さの評価の規準として採用した。

従来の二つの簡単な物体による運動視差の研究では、二つの物体は左右^{1,10)}または上下^{9,11)}に配置されていた。また、これまでの三次元表面をシミュレートする様なランダムドットパターンを用いた運動視差の研究でも、水平・垂直の二つの方向について奥行きが変化する様な刺激が用いられてきた。ここで水平方向の奥行きの変化は刺激の拡大・縮小変換によって得られ^{5,7)}、垂直方向の奥行きの変化は刺激のずれ変換によって得られる^{2,6,8)}。本報告でも図2 a, c, e, gに示すように、二点刺激および二平面刺激を水平方向に配置しました、線分刺激および傾面刺激の奥行きを水平方向に変化させた水平条件と、図2 b, d, f, hに示すように、それらを垂直方向に配置、変化させた垂直条件の双方について、運動視差情報による奥行き知覚の正確さを検討した。

2. 実験1

実験1では4通りの刺激に対して、運動視差情報による奥行き知覚のaccuracy, すなわち呈示された奥行きの大きさと知覚された奥行きの大きさの間の誤差について検討した。

2.1 実験装置および刺激

刺激を横 13 cm, 縦 10 cm のスクリーンをも

つオシロスコープ (テクトロニクス 604) 上に呈示した。刺激の呈示は、アナログ入出力ボードを介してマイクロコンピュータ (アップル II プラス) によって制御された。実験室内は暗くしたが、更に背景の暗さをより均一にするために、オシロスコープスクリーンの周りを黒い厚紙の管で囲った。オシロスコープの 50 cm 手前に被験者用のあご台があり、オシロスコープの表面と平行に 15 cm 動いた。したがって観察距離は 50 cm であり、スクリーンの大きさを視角に換算すると幅 14.8 度、高さ 11.4 度であった。

二点刺激として、直径 1 mm、視角 6.9 分、のドットを二つ呈示した。それぞれのドットは常に水平方向に運動した。水平条件では二つのドットをスクリーンの水平子午線上に配置し (図 2 a)、あご台の運動に結合して反対方向に等量動かし、したがってあご台が一つの方向に動くとき二つのドットの間の距離が増加し、反対方向に動くとき減少した。二つのドットの間の距離はあご台が丁度中間の位置にあるときに、8.6 度であった。垂直条件では二つのドットを垂直方向に離れて配置し (図 2 b)、その間の距離は 5.7 度であった。それぞれのドットをあご台の運動に結合して反対方向に等量動かし、二つのドットはあご台が丁度中間の位置にあるときに、スクリーンの垂直子午線上に位置した。

二平面刺激を構成するランダムドットパターンを構成するそれぞれのドットは二点刺激で用いたものと同じものであった。スクリーン上のドットの総数は 576 個で、平均密度は 1 cm^2 あたり 5.9 個であった。全てのドットは、あご台の運動に結合して常に水平方向に運動した。水平条件では二つの平面を水平方向に配置し (図 2 c)、左側の平面を構成する全てのドットを同じ方向に等量動かし、右側の平面を構成する全てのドットを反対方向に等量動かし、あご台が一つの方向に動くとき二つの平面の内側のエッジ間の距離が増大し、反対方向に動くとき減少した。エッジ間の距離はあご台が丁度中間の

位置にあるときに、8.6 度であった。垂直条件では二つの平面を垂直方向に配置し (図 2 d)、上側の平面を構成する全てのドットを同じ方向に等量動かし、下側の平面を構成する全てのドットを反対方向に等量動かし、内側のエッジ間の距離は垂直条件の二点刺激と同じ 5.7 度であった。

線分刺激として水平条件では幅 1 mm、視角 6.9 分、の水平線分を呈示した (図 2 e)。線分はスクリーンの水平子午線上に位置し、その中心はスクリーンの中心にあった。あご台が一つの方向に動くとき線分の長さが増加し、逆の方向に動くとき減少した。あご台が丁度中間の位置にあるときに、線分の長さは 8.6 度であった。垂直条件では幅 1 mm、視角 6.9 分、の垂直線分を呈示した (図 2 f)。線分の中心はスクリーンの中心に位置した。あご台が一つの方向に動くとき線分が一つの方向に傾き、逆の方向に動くとき逆の方向に傾いた。あご台が丁度中間の位置にあるときに線分は垂直でその長さは 5 cm、視角 5.7 度、であった。

傾面刺激を構成するランダムドットパターンのそれぞれのドットは二点刺激で用いたものと同じものであった。スクリーン上でのドットの総数は 768 個で、平均密度は 1 cm^2 あたり 5.9 個であった。全てのドットは、あご台の運動に結合して常に水平方向に運動した。水平条件では、あご台が一つの方向に動くときランダムドットパターンが水平方向に拡大し、反対方向に動くとき水平方向に縮小した (図 2 g)。垂直条件ではランダムドットパターンが、あご台の運動に結合して水平方向にずれた (図 2 h)。

二点刺激と二平面刺激におけるドットは、あご台の 15 cm の運動に対して 4.5 mm、視角 30.9 分、運動した。運動視差情報によって知覚される、二つの点の間および二つの平面の間の奥行きは 30.0 mm、等価視差 23.4 分、であった。線分刺激と傾面刺激の運動の量は、二点刺激の二つのドットが呈示される位置において、二点刺激と同じ量になるようにした。すなわち水平条件ではスクリーンの垂直子午線から 4.3 度離

れたところでまた、垂直条件ではスクリーンの水平子午線から2.9度離れたところで、あご台が15 cm 運動したときに刺激が4.5 mm、視角30.9分、運動し、これらの位置での奥行きが30.0 mm、等価視差23.4分であった。水平条件ではスクリーンの垂直子午線また、垂直条件ではスクリーンの水平子午線での奥行きが0であった。その他の位置での刺激の運動の量は、上記の位置と子午線を結ぶ静止した線または傾面によって生じる相対運動をシミュレートした量であった。したがって、シミュレートされた線分および傾面の傾きは水平条件では21.7度、垂直条件では30.6度となった。当然のことながら線分刺激と傾面刺激では奥行き、したがって等価視差が位置によって徐々に変化するが、以下では簡単のためにこれらの刺激の等価視差をも23.4分と記することにする。

2.2 実験手続

被験者はスクリーンを好みの眼で観察しながら、頭をのせたあご台を一つの端から他の端まで(15 cm) 往復運動させた。刺激の呈示時間は15秒間であった。スクリーンの中央に十字形の固視点を呈示し、被験者には固視を維持しながら頭を動かすように指示した。被験者は自分にとって心地良く感じる速度で頭を動かしたが、約2秒で1周期を動かすのが常であった。全体のうち半数の試行ではスクリーンの左側または上側のドットが頭と反対方向に運動した。したがって、運動視差情報によれば左側または上側の点または平面が右側または下側のものより近いことまた、線分または傾面が左側または上側が近くにあるように傾いていることが示された。他の半数の試行ではドットの運動方向が逆であったので、運動視差情報によって示される刺激の奥行き関係や傾きの方向が逆であった。

被験者は二点刺激および二平面刺激では、刺激のどちら側が近くに見えたかを答え、次いで二つの点または面の間の知覚される奥行きに、棒に通された二つの輪の間の間隔をマッチングさせた。これに対して線分刺激および傾面刺激

では、刺激の知覚される傾きに棒の角度をマッチングさせた。棒は水平条件では垂直軸の周りに回転し、垂直条件では水平軸の周りに回転するようになっていた。被験者が輪または棒を調整している時には実験者は机上のランプを点灯し、視覚系を用いたマッチングが出来るようにした。被験者の設定値は、知覚される奥行きについては1 mmごと、知覚される傾きについては1度ごとの精度で読み取られた。被験者から要求があった場合には試行は繰り返された。それぞれの被験者で合計80回の試行があった。すなわち、4通りの刺激(二点/二平面/線分/傾面)、2通りの奥行き方向(水平/垂直)、2通りの奥行き関係(左または上側手前/右または下側手前)の5回の繰り返しであった。試行全体は、刺激と奥行き方向の8通りの組み合わせごとの8つのブロックにより構成された。8つのブロックの実験順序はランダムであり、ブロック内の10試行での奥行き関係もランダムであった。大学関係者10名が自発的に被験者として参加した。

2.3 結果

二通りのデータを分析する。まず第一に知覚された奥行き関係について分析し、次いで奥行き知覚のaccuracy、すなわち呈示された奥行きの大きさと知覚された奥行きの大きさの間の誤差について分析する。

いくつかの試行で、被験者が知覚した奥行きの関係または傾きの方向が、運動視差情報によって示されたものと反転した。奥行き関係の反転が起こった試行の割合を刺激、奥行き方向、運動視差による奥行き関係の組み合わせごとに求めたが、その被験者間の平均値を図3に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差である。奥行きが水平方向に変化する条件では奥行き関係の反転が起こった試行の割合は小さいが、奥行きが垂直方向に変化する条件では二点刺激と線分刺激において奥行き関係の反転が頻繁に起こっていることが分かる。

奥行きが水平方向に変化する条件では、二要因(刺激、運動視差による奥行き関係)繰り返し返

し分散分析によれば刺激要因の効果が統計的に有意であった ($F_{3,27} = 3.57, p < 0.05$)。Tukey 検定によれば、これは線分刺激と傾面刺激の間の差が有意であることによることが示された。したがって水平方向の奥行き関係の知覚に関して、二点刺激による運動視差情報は他の刺激によるものと同程度に有効であるけれども、線分刺激による運動視差情報は傾面刺激によるものに比べてその奥行き関係があいまいであるといえる。

奥行きが垂直方向に変化する条件では、二点刺激と線分刺激において運動視差情報が上側の刺激または部分が近くにある事を示す場合に奥行き関係の反転がしばしば生じた。これに対して運動視差情報が下側の刺激または部分が近くにある事を示す場合には、全ての刺激において奥行き関係の反転はほとんど起こらなかった。二要因 (刺激, 運動視差による奥行き関係) 繰返し分散分析によれば、刺激要因の効果 ($F_{3,27}$

$= 7.55, p < 0.01$)、運動視差による奥行き関係の効果 ($F_{1,9} = 12.94, p < 0.01$)、相互作用の効果 ($F_{3,27} = 7.80, p < 0.01$) の全てが統計的に有意であった。Tukey 検定によれば、運動視差情報が上側の刺激または部分が近くにある事を示す場合に、二点刺激と線分刺激に対する奥行き関係の反転が他の刺激に対するものと有意に異なっていることが示された。また、線分刺激に対する奥行き関係の反転は二面刺激に対するものと有意に異なり、二点刺激に対する奥行き関係の反転は二面刺激および傾面刺激に対するものと有意に異なることが示された。したがって垂直方向の奥行き関係の知覚においては、運動視差情報が下側の刺激または部分が近くにある事を示す場合には、二点刺激による運動視差情報は他の刺激によるものと同程度に有効であることが明らかになった。これに反して、運動視差情報が上側の刺激または部分が近くにある事を示す場合には、二点刺激と線分刺激による運動視差

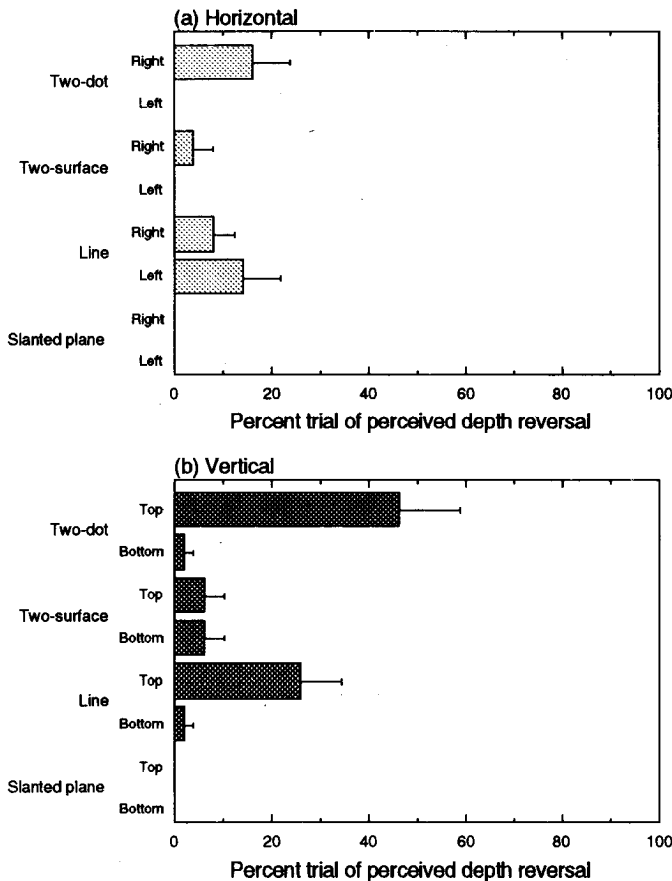


図3 それぞれの刺激における奥行き関係の反転が起こった割合の被験者間の平均。(a) 奥行きが水平方向に変化する場合、(b) 奥行きが垂直方向に変化する場合。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

情報は二平面刺激、傾面刺激によるものに比べてあいまいなものであるといえる。

奥行きが水平方向に変化する条件での、知覚された奥行きの大さの被験者間の平均値を図4に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差である。なお横軸の値は、異なった刺激の間での比較が出来るように等価視差に換算して示した。二点刺激と二平面刺激では知覚された奥行きが30.0mmのときに、また、線分刺激と傾面刺激では知覚された傾きが21.7度のときに等価視差が23.4分となる。このとき呈示された奥行きの大さと知覚された奥行きの大さの間の誤差が0、すなわち accuracy が100%であり、図4に破線で示す。傾面刺激に対して知覚される奥行きが一番大きいけれども、accuracy は100%には達していない。式(1)からも明らかのように、運動視差情報によって奥行きを知覚するためには固視点までの距離、物体の網膜像の移動量、頭の移動量の三つの量が必要であり、これらが全て正確に求められ更に、必要な計算が正しく行なわれて始めて accuracy が100%となる。刺激の空間周波数特性³⁾や固視点までの距離⁶⁾に応じて運動視差情報によって知覚される奥行きの大さが異なることが報告されており、本報告で採用した実験条件では傾面刺

激に対する accuracy が100%とならないことは十分にありうることである。むしろ傾面刺激に対する accuracy が85%にも達していることは、本報告で用いた実験条件が我々の運動視差情報処理メカニズムにとって適したものであったことを意味するものと考えられる。

ここでは傾面刺激に対して知覚される奥行きの大さを規準にして、他の刺激による奥行きの大さを比較検討することにした。図4からも明らかなように、二点刺激、二平面刺激、線分刺激によって知覚される奥行きは傾面刺激によるものより少ないが、特に線分刺激に対して知覚される奥行きが他の刺激に対するものに比べて少ない。二要因(刺激、運動視差による奥行き関係)繰返し分散分析によれば、刺激要因の効果($F_{3,27}=2.98, p<0.05$)が統計的に有意であった。Tukey検定($p<0.05$)によれば、線分刺激と傾面刺激が有意に異なっていることが示された。これに対して二点刺激および二平面刺激に対する知覚された奥行きの大さは、傾面刺激に対するものより少ないけれども、その差は統計的に有意ではなかった。したがって水平方向の奥行きを知覚に関しては、二点刺激による運動視差情報は他の刺激によるものに比べて顕著に少なくはないと結論出来る。これに対し

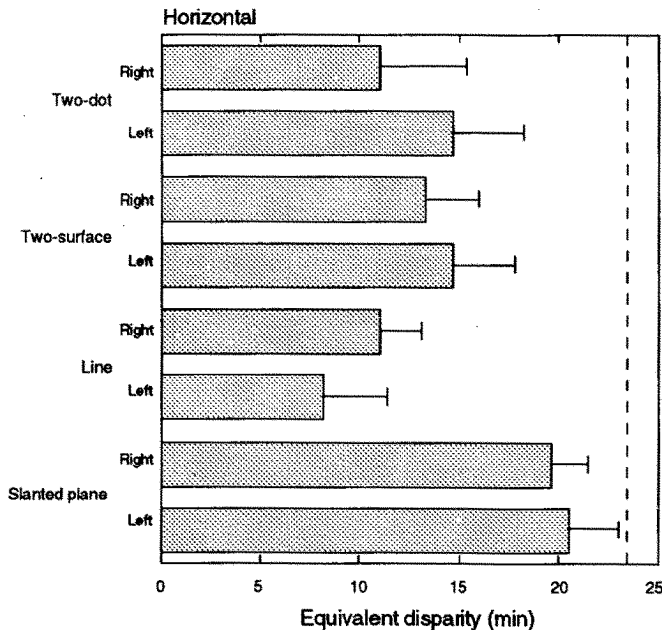


図4 奥行きが水平方向に変化する場合の、それぞれの刺激に対する知覚された奥行きの大さの被験者間の平均。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

て線分刺激による運動視差情報は傾面刺激によるものに比べて有意に少ないが、図3に示すようにこの刺激に対しては有意な頻度で知覚される奥行き関係の反転が起こっていた。知覚された奥行きの大きさを計算した際には、奥行き関係の反転が起こった試行も含んだので、線分刺激に対するものは小さな値となってしまう。そこですべての刺激で、知覚された奥行きの方向

が運動視差によって示された奥行きの方向と一致した場合のみの、知覚された奥行きの大きさを再計算し、その被験者間の平均値を図5に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差、破線は accuracy 100% に対応した等価視差である。図4と比べて、知覚される奥行き関係の反転が目立った右側が手前の二点刺激と線分刺激で知覚された奥行きの大きさが増加し、傾面刺激以

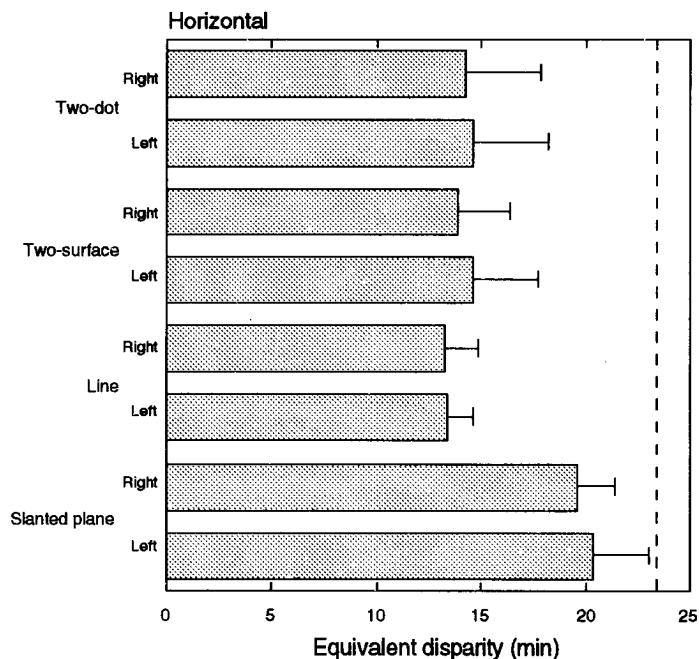


図5 奥行きが水平方向に変化する場合の、それぞれの刺激に対する運動視差によって示される奥行きの方向と知覚された奥行きの方向が一致するときの知覚された奥行きの大きさの被験者間の平均。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

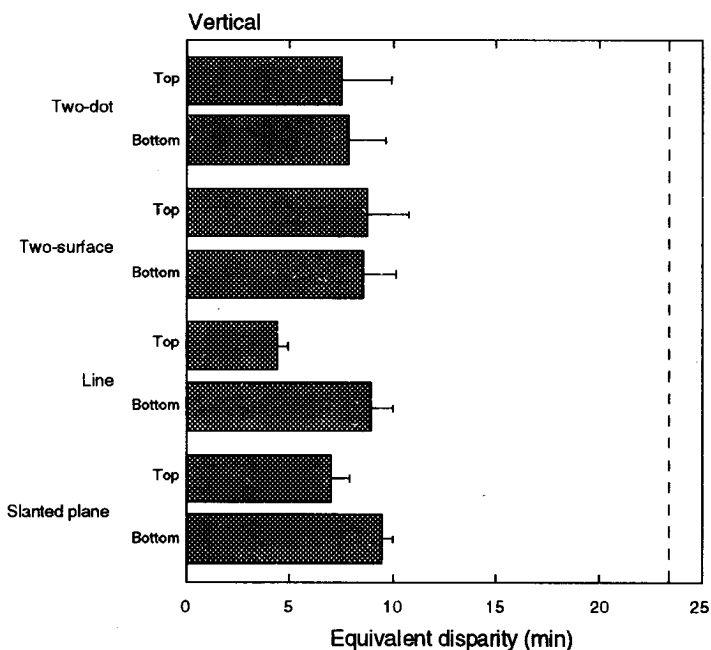


図6 奥行きが垂直方向に変化する場合の、それぞれの刺激に対する運動視差によって示される奥行きの方向と知覚された奥行きの方向が一致するときの知覚された奥行きの大きさの被験者間の平均。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

外の3通りの刺激に対してはほぼ同じ程度の奥行きが知覚されている。二要因（刺激、運動視差による奥行き関係）繰り返し分散分析によればすべての要因が有意でなく、運動視差情報により示される奥行きの方向と知覚される奥行きの方向が一致する場合には、すべての刺激において知覚される奥行きの大きさ、すなわち accuracy に顕著な差がないといえる。したがって水平方向の奥行き関係の知覚に関しては、二点刺激や線分刺激による運動視差情報は傾面刺激によるものと同程度に有効であるが、その奥行き関係に関する情報はオプティカルフローの豊かな傾面刺激や二平面刺激に比べて不安定であると結論できる。

奥行きが垂直方向に変化する条件では、前述したように二点刺激と線分刺激において運動視差情報が上側の刺激または部分が近くにある事を示す場合に約半数の試行で知覚される奥行きの方向が運動視差によって示されるものと反対になるために、全試行の代数的平均をとったのでは知覚された奥行きの大きさが小さな値として示されてしまう。そこでこれら二つの刺激に対しては、それぞれの知覚された奥行きの方向ごとに知覚された奥行きの大きさを計算した。知覚された奥行きの方向が運動視差によって示された奥行きの方向と一致した場合、知覚された奥行きの大きさの被験者間の平均値を図6に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差である。ここでも横軸の値は、異なった刺激の間での比較出来るように等価視差に換算して示した。二点刺激と二平面刺激では知覚された奥行きが30.0mmのときにまた、線分刺激と傾面刺激では知覚された傾きが30.6度のときに等価視差が23.4分となる。このときに accuracy が100%であり、図6に破線で示す。図5に示した奥行きが水平方向に変化する条件と比較すると、奥行きが垂直方向に変化する条件では知覚された奥行きの量が小さく、傾面刺激に対しても accuracy は35%であった。しかしながらすべての刺激について奥行きは明瞭に知覚されており、傾面刺激に対して知覚される奥行きの大き

さを規準にして、他の刺激による奥行きの大きさを比較検討することには問題はないと考えられる。図6を見ると、すべての刺激についてほぼ同程度の奥行きが知覚されていることが分かる。また、運動視差情報が下側の刺激または部分が近くにある事を示す場合の方が、運動視差情報が上側の刺激または部分が近くにある事を示す場合に比べて知覚された奥行きが大きいことも分かる。二要因（刺激、運動視差による奥行き関係）繰り返し分散分析によれば、運動視差による奥行き関係の効果 ($F_{1,9} = 5.80, p < 0.05$) が統計的に有意であった。したがって二点刺激による運動視差情報は、垂直方向の奥行きの知覚に関しても他の刺激によるものに比べて顕著に少なくはないと結論出来る。ところで傾面刺激に対しては、知覚される奥行きの方向は非常に安定していたが、知覚される奥行きの量は下側の部分が近くにあると知覚される場合の方が大きくなるという非対称性があることが示された。

二点刺激と線分刺激に対しては知覚される奥行きの反転が高い頻度で起こったので、運動視差によって示される奥行きの方向と知覚された奥行きの方向の組み合わせごとに知覚された奥行きの大きさを計算した。その結果を図7に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差である。なお運動視差情報が下側の刺激または部分が近くにある事を示す場合に上側の刺激または部分が近くにある知覚される事はほとんどなかったため、この組み合わせは分析から除いた。また、被験者によってはある組み合わせの知覚を示さない場合があったので、それぞれの組み合わせごとの被験者数が図7に示されている。二点刺激では、知覚される奥行きの方向が運動視差によって示されるものと異なる場合に、知覚される奥行きの大きさが小さくなることが分かる。これに対して線分刺激では、運動視差によって上側の部分が近くにあると規定される場合に、知覚される奥行きの方向にかかわらず知覚される奥行きの大きさが小さくなることが分かる。三要因（刺激、運動視差による奥

行き関係, 知覚された奥行き関係) 繰り返し分散分析によれば, 運動視差による奥行き関係の効果 ($F_{1,9}=5.36, p<0.05$) が統計的に有意であった。データの得られない組み合わせが多かったために相互作用の効果を分析することは出来ないが, コントラスト分析によれば二点刺激については下側の刺激が近くにあると知覚される場合に, 運動視差情報によって上側の刺激が近くにあると示される場合と下側の刺激が近くにあると示される場合とで知覚される奥行きの大きさに有意な差があることが示された。また, 線分刺激については, 運動視差情報によって下側の刺激が近くにあると示される場合と, 運動視差情報によって上側の刺激が近くにあると示される場合とで知覚される奥行きの大きさに有意な差があることが示された。

3. 実験 2

実験 2 では二点刺激, 線分刺激, 二平面刺激, 傾面刺激の 4 通りの刺激に対して, 運動視差情報による奥行き知覚の precision, すなわち知覚された奥行きの大きさのばらつきについて検討した。

3.1 実験装置および刺激

実験装置および刺激は実験 1 で用いたものと同じであった。実験 2 でも 4 通りの刺激を構成するドットがあご台の運動に結合して動いた。

実験 1 ではそれぞれの刺激についてあご台が運動する量とそれぞれのドットが運動する量の間の関係は, 23.4 分の等価視差を与えるように設定されていた。これに対して実験 2 ではドットが運動する量の割合をそれぞれのドットの間で一定に保ったまま, 被験者がドットの運動の大きさを制御して等価視差を変化できる様になっていた。

3.2 実験手続き

被験者はスクリーンを好みの眼で観察しながら, 頭をのせたあご台を一つの端から他の端まで往復運動させた。被験者の仕事は, 二点刺激と二平面刺激については刺激の間の知覚される奥行きがなくなるようにまた, 線分刺激と傾面刺激については知覚される傾きがなくなるようにドットの運動の大きさを調整することであった。刺激の呈示時間は特に制限しなかった。それぞれの被験者について 160 回の試行があった。すなわち, 4 通りの刺激 (二点/二平面/線分/傾面), 2 通りの奥行き方向 (水平/垂直) の 20 回の繰り返しであった。実験は 20 回の試行からなる 8 つのブロックからなっていた。それぞれのブロックで刺激と奥行き方向の 8 つの組み合わせのうちの一つが呈示された。8 つのブロックはランダムな順序で呈示された。大学関係者 4 名が自発的に被験者として参加した。かれらはすべて実験 1 の被験者でも

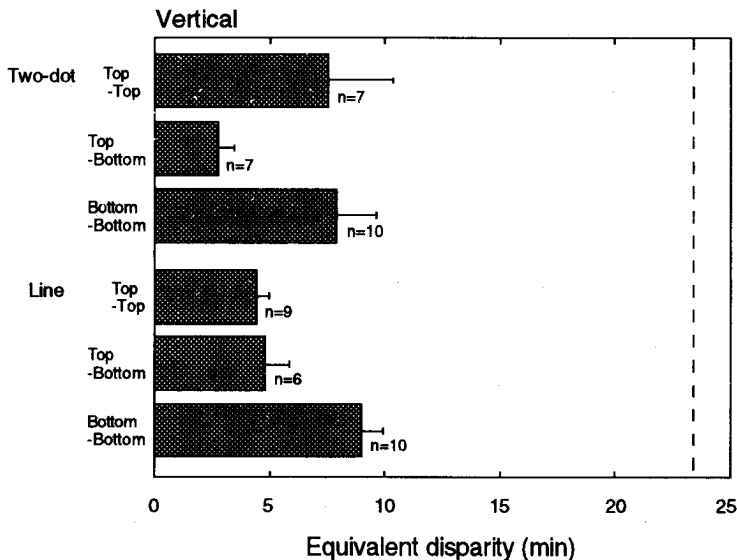


図 7 奥行きが垂直方向に変化する場合の, 二点刺激と線分刺激に対する運動視差によって示される奥行きの方向と知覚された奥行きの方向の組み合わせごとに知覚された奥行きの大きさの被験者間の平均。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

あった。

3.3 結果

運動視差情報による知覚される奥行きの大さきのばらつきは、それぞれの刺激、奥行き方向に対する 20 回の試行における被験者の設定値の標準偏差によって表わした。知覚される奥行ききのばらつきの被験者間の平均を図 8 に示す。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差である。なお横軸の値は実験 1 の場合と同様、異なった刺激の間での比較が出来るように等価視差に換算して示した。知覚される奥行ききのばらつきが 0 のときに、precision が 100% となる。奥行きが垂直方向に変化する場合の方が、水平方向に変化する場合よりばらつきが小さい。また、奥行きがいずれの方向に変化する場合でも、二平面刺激に対するばらつきが他の刺激に対するものに比べて小さく、線分刺激に対するばらつきが

他の刺激に対するものに比べて大きいことが分かる。二要因（刺激、奥行き方向）繰り返し分散分析によれば、刺激要因の効果 ($F_{3,9} = 10.37, p < 0.05$) と奥行き方向の要因の効果 ($F_{1,9} = 6.52, p < 0.05$) が統計的に有意であった。奥行きが垂直方向に変化する場合の方が、水平方向に変化する場合より precision が高かった。Tukey 検定によれば、二平面刺激と線分刺激の差が有意であることが示された。二点刺激と傾面刺激を比較すると、precision に顕著な差がなく、簡単な物体間の奥行きに関しても運動視差情報は安定した知覚を与える結論出来る。

4. 考察

オプティックフローの豊かさと相対運動の連続性が異なる、二点刺激、二平面刺激、線分刺激、傾面刺激の四通りの刺激に対して、奥行き

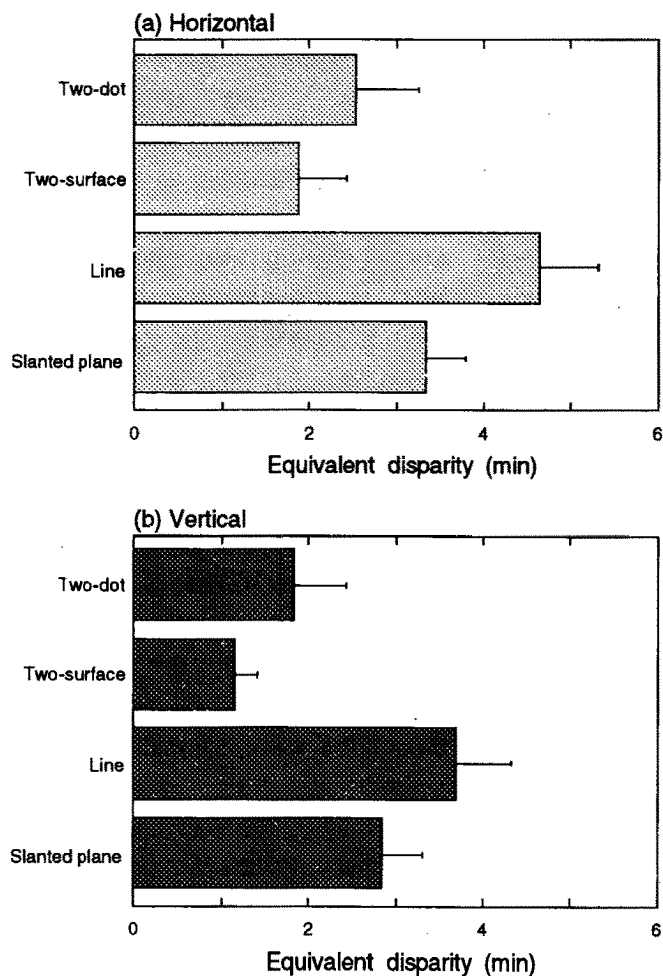


図 8 それぞれの刺激に対する知覚される奥行ききのばらつきの被験者間の平均。(a) 奥行きが水平方向に変化する場合、(b) 奥行きが垂直方向に変化する場合。誤差棒は被験者間の平均の標準誤差。

の知覚における運動視差情報の正確さを accuracy と precision の二つの測度によって検討した。奥行きが水平方向に変化する場合でもまた、垂直方向に変化する場合でも、それぞれの刺激による運動視差情報による奥行き知覚の accuracy と precision は大きくは変わらなかった。この結果は、われわれの視覚系が簡単な物体の間の奥行き知覚においても運動視差情報を有効に使うことができることを実験的に証明するものであり、本報告の目的である「視覚系が運動視差情報を使ってどの程度正確に簡単な物体間の奥行きを知覚することができるか」という疑問に対しては「オプティックフローの豊かな、相対運動が連続な三次元表面の奥行きの知覚と同じ程度に出来る」という肯定的な答えが得られた。

しかしながら運動視差情報によって知覚される奥行きの大きさ、すなわち accuracy, の特性は奥行きが変化する方向によっていくつかの面で異なっていた。まず第一に、奥行きが水平方向に変化する場合の方が垂直方向に変化する場合よりも accuracy が高いことが示された。我々の奥行き視のメカニズムのなかで運動視差情報によるものと特性が類似している、共通したものを持っていると考えられているのが両眼視差情報によるメカニズムである³⁹⁾。両眼視差情報による奥行き視のメカニズムには異方性があることが知られている。例えば、クレイクーオブライエンーコインスイート錯視を引き起こすための輝度変化と同じ様な関数で両眼視差の大きさが変化する刺激を呈示すると、両眼視差が水平方向に変化する場合には奥行き錯視が生起されるが、垂直方向に変化する場合には奥行きが知覚されない¹²⁾。また、正弦波状に両眼視差が変化する刺激に対する奥行き視感度は、視差が水平方向に変化する場合の方が垂直方向に変化する場合に比べて2~3倍高い¹³⁾。運動視差情報による奥行き視においても両眼視差情報によるものと同様の異方性が示唆され、実際に運動視差情報によるクレイクーオブライエンーコインスイート型の錯視が奥行きが水平方向に変化

する場合にしか生起されないことから、それぞれの奥行きが変化する方向に対応して、異なった空間周波数特性をもつ運動視差情報処理メカニズムの存在が提案されている⁹⁾。本報告で採用した刺激の空間的特徴が水平方向の奥行き変化に対する運動視差情報処理メカニズムにとってより有利なものであったとすれば、本報告の結果はこの提案の正当性を支持するものであると考えられる。ただし、本報告で採用した等価視差または、運動視差の勾配の大きさが水平方向の奥行き変化に対する運動視差情報処理メカニズムにとって有利であった可能性もある。本報告の目的は運動視差情報を使ってどの程度正確に簡単な物体間の奥行きを知覚することができるかを明らかにすることであったため、その実験条件は運動視差情報による奥行き視メカニズムの異方性を検討するには計画されておらず、今後より組織的な研究が必要であろう。

第二に奥行きが水平方向に変化する場合には、刺激の左右いずれの側が近くに見えるかという知覚される奥行きの方向は、線分刺激を除いてはほとんどの場合に運動視差情報によって示される通りであって安定していた。これに対して奥行きが垂直方向に変化する場合には、刺激の上下いずれの側が近くに見えるかという知覚される奥行きの方向は、必ずしも常に運動視差情報のみによっては決定されなかった。二点刺激と線分刺激では、運動視差情報によって刺激の上側が近くにあると示されているにもかかわらず、刺激の下側が近くにあると知覚されることが全試行の約半数で起こった。また、運動視差情報によって刺激の下側が近くにあると示される場合のほうが、刺激の上側が近くにあると示される場合に比べて知覚される奥行きが大きくなった。我々の視覚系には刺激の下側の部分をより近くにあると知覚するという一般的傾向があり（例えば Rock¹⁴⁾ 参照）、運動視差による奥行き¹¹⁾ や運動速度による奥行きと見かけの大きさの変化¹⁵⁾ においてもこの傾向がみられることが報告されている。我々の結果は、この傾向と運動視差情報による奥行きの知覚の間で

矛盾がある場合には、知覚される奥行きが減少するばかりではなく、運動視差情報が示すものとは反対方向の奥行きが知覚されることさえあることを示している。特に知覚される奥行き方向の反転は、オプティカルフローが豊かでない二点刺激と線分刺激において顕著に現われており、この相互作用は刺激の空間的特徴によって異なって影響することが示唆される。

二点刺激や線分刺激のような簡単な物体に対する運動視差情報による奥行きの知覚に対して矛盾した奥行き情報の影響が強いのが、これらの刺激における運動視差情報が弱いことによるのか、それとも二点刺激や線分刺激のような刺激配置では刺激の下側をより近くに知覚する傾向が強まることによるのかは本報告の結果からは明らかではない。ところで矛盾した奥行き情報として動的遮蔽情報が存在する場合にも、運動視差情報によるものとは反対の方向の奥行きが知覚されることが報告されており⁷⁾、奥行き関係の反転は運動視差情報による奥行き知覚につきまとう特徴の様に思える。一つの仮説として、運動視差情報をベクトル量というよりはむしろスカラー量として考えることが出来る。すなわち、運動視差情報は二つの物体の間の奥行きの量については強い情報を与えるけれども、物体の間の奥行き関係については弱い情報しか与えないと考えるのである。それゆえに、奥行き関係についてより強い情報を与える他の手掛かりがあるときには、知覚される奥行きの関係はその手掛かりによって決定され、運動視差情報によって示される奥行きの量はそれ自身の奥行き関係に関する情報を顧みることなく使われることになる。図7に示される様に、刺激の下側の部分をより近くにあると知覚するという傾向によって知覚される奥行きの方向が決定される場合に、この情報は奥行きの大きさについての情報を与えないにもかかわらず大きさを持った奥行きが知覚されている。動的遮蔽情報が存在する場合にも同様の傾向が報告されており、運動視差情報をスカラー量として考える仮説が支持される。

知覚される奥行きのばらつきは、線分刺激について若干大きく、二平面刺激で若干小さいものの大きな差はなく、4通りの刺激について同程度のprecisionであることが示された。これは必ずしも豊かなオプティックフローや連続的な奥行きの変化がなくても、運動視差情報を用いて同じ程度に安定した奥行き知覚が得られることを意味する。また、奥行きの方向が垂直方向に変化する場合の方が水平方向に変化する場合よりもばらつきが有意に小さいことも明らかになった。これは、前述した奥行きが水平方向に変化する場合と垂直方向に変化する場合とで、運動視差情報による奥行き知覚の特性が異なることを反映するものであると考えられる。

本報告において他の刺激と異なる結果を示したのは、当初予測していた二点刺激ではなく、むしろ線分刺激であった。運動視差情報によって示される奥行きとは反対方向の奥行きが、線分刺激で最も頻繁に知覚された。また、知覚された奥行きの大きさは、奥行きが水平方向に変化する場合でも、それが垂直方向に変化する場合でも線分刺激に対するものが他の刺激に対するものより小さかった。さらに、知覚される奥行きの大きさのばらつきも線分刺激に対するものが他の刺激に対するものより大きかった。これが線分という刺激に特有のものであるか、あるいはなんらかのアーティファクトなのかは本報告の結果からは明らかでない。線分刺激は、視覚系にとって基本的な刺激でありながら、これまで運動視差による奥行き視の研究にあまり用いられてこなかった刺激であり、今後の研究が必要であろう。

文 献

- 1) L. Heine: Über Wahrnehmung und Vorstellung von Entfernungsdifferenzen [On perception and conception of distance differences]. *Albrecht von Graefes Archiv für Klinische und Experimentelle Ophthalmologie*, 61, 484-498, 1905.
- 2) B. Rogers and M. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134, 1979.

- 3) B. Rogers and M. Graham: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, **22**, 261-270, 1982.
- 4) M. Graham and B. Rogers: Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, **11**, 247-262, 1982.
- 5) B. Rogers and M. Graham: Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces. *Science*, **221**, 1409-1411, 1983.
- 6) M. E. Ono, J. Rivest and H. Ono: Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information. *Journal of Experimental Psychology*, **12**, 331-337, 1986.
- 7) H. Ono, B. Rogers, M. Ohmi and M. E. Ono: Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, **17**, 255-266, 1988.
- 8) H. Ono and M. J. Steinbach: Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception and Psychophysics*, **48**, 179-187, 1990.
- 9) B. Bourdon: La perception visuelle de l'espace [Visual space perception]. Paris, Librairie Schleicher Frère, 1902.
- 10) E. S. Eriksson: Movement parallax and distance perception. *Report 117, Department of Psychology, University of Uppsala, Sweden*, 1972.
- 11) E. S. Eriksson: Movement parallax during locomotion. *Perception and Psychophysics*, **16**, 197-200, 1974.
- 12) S. M. Anstis, I. P. Howard and B. J. Rogers: A Craik-O'Brien-Cornsweet illusion for visual depth. *Vision Research*, **18**, 213-217, 1978.
- 13) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: Sensitivity to horizontally and vertically oriented stereoscopic corrugations as a function of corrugation frequency. *Perception (Supplement)*, **22**, 117, 1993.
- 14) I. Rock: An introduction to perception. New York, MacMillan, 1975.
- 15) H. Kaneko and K. Uchikawa: Apparent relative size and depth of moving objects. *Perception*, **22**, 537-547, 1993.