

大きな両眼視差領域における運動視差による 立体視の促進効果

宮屋敷英弘・佐藤 雅之

北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科
〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 1-1

(受付：2005年10月5日；改訂稿受付：2006年5月15日，2007年1月9日；受理：2007年1月23日)

Facilitation of Stereoscopic Depth Perception for Large Disparities Resulting from Motion Parallax

Hidehiro MIYAYASHIKI and Masayuki SATO

Graduate School of Environmental Engineering, University of Kitakyushu
1-1 Hibikino, Wakamatsu, Kitakyushu 808-0135, Japan

(Received 5 October 2005; Received in revised form 15 May 2006, 9 January 2007; Accepted 23 January 2007)

This study examined the cue integration of retinal disparity and motion parallax by measuring perceived depth in the large range of disparity (9' to 390') when both cues were available at the same time and when only one of these cues was available. The test stimulus presented on a computer monitor was a gray disc, 2 deg in diameter, surrounded by a random-dot pattern as a reference. The observer reported an extent of apparent depth by manually adjusting distance between two rods. The results showed that when both cues were available the perceived depth was much larger than that when only one of these cues was available in the large disparity conditions (>around 90'), suggesting nonlinear interaction between disparity and motion parallax cue processing.

1. ま え が き

我々は、さまざまな手がかりによる奥行き情報を統合することにより、外界を3次的に知覚している^{1,2)}。奥行きの手がかりとして、両眼視差と運動視差の他に、陰影、遮蔽、線遠近法や大気遠近法などの絵画的な手がかり、両眼の輻輳角や水晶体の調節などの網膜外の情報などを挙げるができる。

両眼視差は、条件さえ満たせば非常に明瞭な奥行き感を生じさせることができ、立体映画やバーチャルリアリティなどの映像表示システム

において現実に広く活用されているが、それが奥行き手がかりとして有効である視差量の範囲は必ずしも広くないことが指摘されている³⁾。視差量を大きくしていくと、それに応じて知覚される奥行き量は増加するが、さらに視差量を大きくしていくと知覚される奥行き量は幾何学的な予測とは反対に減少し始め、最終的には奥行きが知覚されなくなる。また、知覚される奥行き量が減少するのに伴い、二重像の知覚が顕著になることが知られている。

運動視差も奥行きの手がかりとして有効であることが示されているが⁴⁾、両眼視差と同様に、

それが有効な奥行き手がかりとして働く視差量^{注)}には限界があることが知られている^{5,6)}。Ono と Ujike の研究⁶⁾は、運動視差が 10 arc min から 1 arc deg 程度の場合に知覚される奥行き量が最大となることを示している。そのとき知覚された奥行き量は、観察距離 57 cm において、1~2 cm 程度であった。それより視差量を大きくしていくと知覚される奥行き量はかえって減少し、213 arc min の視差量に対して知覚された奥行き量はゼロであった。このときテスト刺激には動きのみが知覚された。

これらの研究は、両眼視差や運動視差は有効な奥行き手がかりであるが、それらが奥行き手がかりとして働く範囲は注視位置の前後の狭い領域に限られることを示している。しかし、普段我々が外界から視覚情報を獲得する際に、単眼で頭を動かすことは稀である。これまでの研究の多くは、両眼視差あるいは運動視差に関して、手がかりが単独で存在する場合の奥行き知覚特性を測定しているが、通常我々は自由に動くことが許された環境の下で両眼を用いて外界から視覚情報を獲得している。単独では奥行き手がかりとして有効ではない大きな視差に対しても、両方の手がかりが同時に存在する場合には、相互作用が存在し、大きな奥行きが知覚される可能性があるのではないだろうか。これまでに行われた両眼視差と運動視差の相互作用に関する研究⁷⁻¹⁰⁾は、閾付近での効果を測定したものが多く、大きな視差に対する奥行き知覚特性を測定した研究はない。

本研究の目的は、両眼視差あるいは運動視差単独では奥行きが知覚されにくい大きな視差量に対して、両眼視差と運動視差が同時に存在する場合に何らかの相互作用により大きな奥行きが知覚されるかどうかを明らかにすることである。ここでは、両眼視差のみが与えられた場合、運動視差のみが与えられた場合、両眼視差と運

動視差の両方が同時に与えられた場合における知覚される奥行き量を測定し、これらと比較した。両眼視差と運動視差が同時に与えられた条件では、2つの視差の量と方向が矛盾なく一致していた。

2. 実験方法

2.1 実験装置と刺激

立体視対応のグラフィックスボード (3Dlabs 社製 Wildcat VP870) を搭載したウィンドウズ PC を用いて生成した刺激パターンを 21 インチの CRT モニタ (ナナオ社製 FlexScan T965) に呈示した。被験者は、液晶シャッターメガネ (StereoGraphics 社製 CrystalEyes 3) を用いた時分割立体方式により立体画像を観察した。モニタのフレームレートは 120 Hz であった。すなわち、右目用と左目用のパターンはそれぞれの目に毎秒 60 フレームずつ呈示された。モニタの解像度は 1024×768 ピクセルであった。観察距離は 57 cm であった。実験は暗室で行われ、被験者には刺激以外のものは何も見えなかった。

図 1 に実験で用いた刺激をステレオグラムにより示す。刺激画像の中央下部に直径 0.2 deg の黒い固視点を呈示した。テスト刺激は、固視点より 1.5 deg 上の位置を中心とする直径 2 deg の円盤であった。黒い背景上に白いテスト刺激を呈示するとクロストークにより二重像が知覚されたために、背景はグレーとし、右 (左) 目用のテスト刺激が左 (右) 目から見えないように、背景 (7.3 cd/m^2) とテスト刺激 (9.5 cd/m^2) の輝度を選択した。テスト刺激に対する奥行きの判断を容易にするために、参照刺激として視野の上下にランダムドットを呈示した。ランダムドットの輝度は、白と黒のドットがそれぞれ 46.9 cd/m^2 と 0.0 cd/m^2 であった。上と下のドットパターンの間隔、すなわちグレーの領域の高さは 4 deg であった。図 1(a) は、テスト刺激に

注) ここでは運動視差の大きさは等価視差によって記述されている。運動視差の大きさは注視位置と対象物の奥行きの差のみならず、観察位置の変化量にも依存するので、運動視差が奥行き知覚に及ぼす効果を両眼視差のそれと比較することを容易にするために、運動視差量は両眼間距離に等しい観察位置の変化における視差量で記述されることが多い。この値を等価視差量という。本研究においても等価視差により運動視差の大きさを記述した。

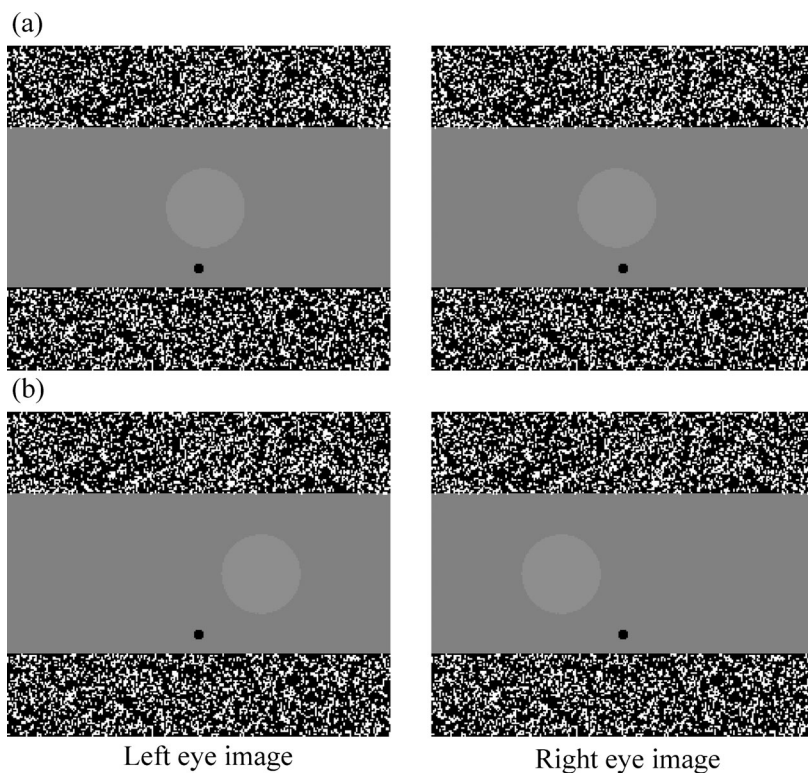


図1 テスト刺激のステレオグラム。(a) 比較的小さな交差視差を与えた場合。(b) 比較的大きな交差視差を与えた場合。

比較的小さな交差視差を与えた場合の刺激パターンを表している。(b)は、比較的大きな交差視差を与えた場合を表している。(a)のステレオグラムを観察すると、テスト刺激が固視点やランダムドットよりも近くに浮き上がって見えるが、(b)では、視差量が増加したにもかかわらず知覚される奥行き量が減少するし、二重像が生じる様子を観察することができる。

2.2 頭部運動の振幅と周波数および頭部位置の測定方法

運動視差を与える実験条件において被験者の頭の動きを水平方向に制限するために、図2のように、レールの上を動く台車(THK社製スライドパック)の上にあご台を設置した。被験者があごをあご台に乗せて、頭を水平方向に能動的に動かすことにより、台車はレールの上をスムーズに移動した。ペン入力用のタブレット(ワコム社製Intuos2)を用いて被験者の頭部位

置を計測した。図2のように、ペン型のマウスを台車に取り付け、マウスカーソルの位置から被験者の頭部位置を計算した。運動視差を与える実験条件では、計測された頭部位置の情報に基づいて、テスト刺激の呈示位置を更新した。

被験者の頭部の往復運動の周波数は0.5Hz、移動範囲は13cmとした。OnoとUjike⁶⁾は、頭部の移動速度が約13cm/s以上であれば、運動視差により知覚される奥行き量が頭部の移動速度によらず最大値に収束することを示している。本研究では、頭部運動の負荷が被験者にとって大きくない条件の下で、移動範囲の両端以外では確実に13cm/s以上の移動速度が得られるように、頭部運動の振幅と周波数を選択した。レールの上にクッションを置き、台車の移動範囲を制限した。被験者に頭部運動のテンポを知らせるために、毎秒1回ずつビーブ音を鳴らした。被験者は、その音に合わせて台車が動く範



図2 実験装置.

囲の限界まで頭を左右に動かした.

すべての被験者は、実験を開始する前にビープ音に合わせて頭を動かす練習を行った. 図3(a)にそのときの頭部位置の計測結果を示す. 図3(b)はその値を時間微分したもの, すなわち頭部の移動速度を表している. このように被験者には頭部運動の振幅と周期に関する簡単な手がかりを与えているだけであるが, 5名の被験者の頭部位置は正弦波に近い軌跡を描いていることがわかる. 頭部の運動は, 開始直後では被験者によっては多少の乱れが見られるが, 1~2周期程度の時間を経過した後では周期的であり, 速度の振幅も被験者によらず一定の値となっていることがわかる. 運動視差を与える実験条件では, 被験者は刺激の呈示に先がけて頭部の往復運動を開始し, 実験者によって, 被験者の頭部がスムーズに動いていると判断された場合に,

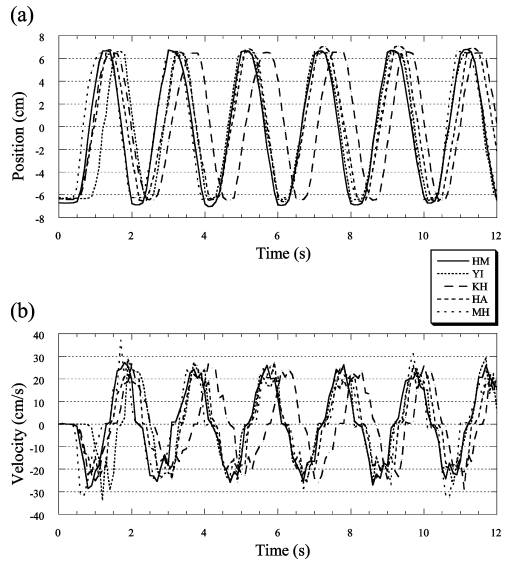


図3 頭部運動の計測結果. 横軸の0sは, 頭部運動開始時を示す. (a) 被験者の頭部位置. (b) 頭部の移動速度.

刺激の呈示を行った. なお, 頭部運動において他の被験者に比べて顕著な位相遅れを示している被験者が1名見られるが, 本研究では, 刺激呈示の際に被験者の頭部位置を計測し, その値に基づいて刺激の呈示位置を決定しているために, 位相の違いは問題ではない.

2.3 実験手続き

(i) 両眼視差のみが与えられる条件では, 被験者は液晶シャッターメガネを着用し, あごをあご台に乗せ, 頭部を動かさずに両眼で固視点を注視した. テスト刺激が4秒間呈示された後に, 被験者は, テスト刺激が固視点およびランダムドットの面に対して奥あるいは手前に知覚されたかどうか, また, テスト刺激が二重像に知覚されたかどうかを応答した. 奥行きが知覚された場合には, ノギスを調節することによりその知覚された奥行きの量を応答した. 奥行きが知覚されなかった場合は, 0cmとした.

(ii) 運動視差のみが与えられる条件では, テスト刺激の呈示に先がけて, 被験者は毎秒1回鳴らされるビープ音に合わせて頭を左右に動かした. 被験者の頭部がスムーズに動いていることを実験者が確認した後に, テスト刺激が4秒

間呈示された。被験者は固視点を注視しながら単眼で刺激を観察した。片方の目は黒い紙により覆われた。この条件においても、刺激の輝度を他の実験条件と等しくするために、被験者は液晶シャッターメガネを着用して刺激を観察した。テスト刺激が呈示された後に、被験者は奥行きが知覚されたかどうか、また、テスト刺激が動いて見えたかどうかを応答した。奥行きが知覚された場合には、知覚された奥行きをノギスを調節することにより応答した。

(iii) 両眼視差と運動視差の両方が与えられる条件では、被験者は、液晶シャッターメガネを着用し、頭を動かしながら両眼でテスト刺激を観察した。テスト刺激が4秒間呈示された後に、被験者は奥行きが知覚されたかどうか、テスト刺激が二重像に知覚されたかどうか、また、テスト刺激が動いて見えたかどうかを応答した。奥行きが知覚された場合には、知覚された奥行きをノギスを調節することにより応答した。

1つのセッション内では、(i) から (iii) のいずれか1つの条件で試行が行われた。テスト刺激に与えられた視差量は $\pm 9, \pm 20, \pm 42, \pm 88, \pm 185, \pm 390$ arc min であった。正の値は非交差視差（通常奥に知覚される）、負の値は交差視差（通常手前に知覚される）を表している。ランダムな順序で刺激の視差量を変化させ、12回の試行を行い1セッションとした。両眼視差のみ、運動視差のみ（右目で観察）、運動視差のみ（左目で観察）、両眼視差と運動視差の両方が与えられる条件の4つの条件につき、すべての被験者は3セッションずつの実験を行った。

2.4 被験者

5名の男子大学生が被験者として実験に参加した。全員が正常な視力または正常な矯正視力を有していた。被験者HMはこの論文の著者である。HM以外の被験者は実験の目的を知らなかった。

3. 実験結果

図4に実験結果を示す。横軸は視差量を表し

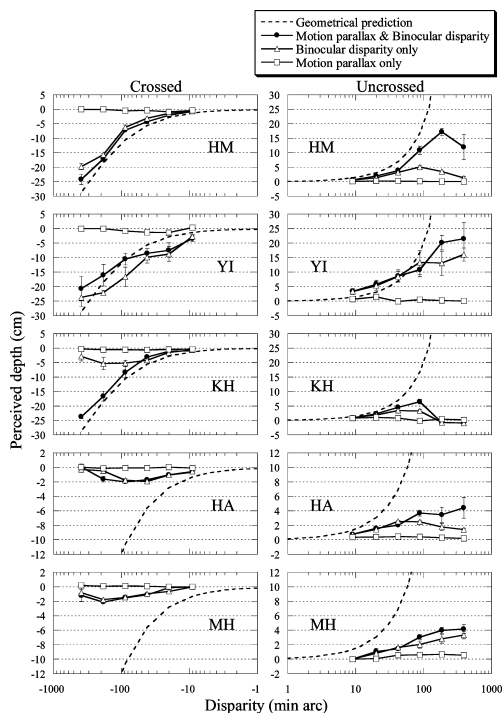


図4 両眼視差と運動視差により知覚された奥行き量。

ている。正の値は非交差視差、負の値は交差視差を表している。縦軸は知覚された奥行き量を表現するために被験者が調節したノギスの読みを表している。ただし、正の値はテスト刺激が固視点やランダムドットよりも奥に知覚されたことを、負の値は手前に知覚されたことを表している。データ点は3回の試行の平均値を表している。ただし、運動視差のみの条件では、刺激を右目に呈示した3回と左目に呈示した3回の結果に系統的な差が見られなかったために、6回の平均値をプロットした。誤差棒は標準誤差を表している。

両眼視差のみの条件 (Δ) では、知覚された奥行き量に関して、2つの点において被験者間で異なる傾向が見られた。第1の点は、知覚された奥行き量の絶対的な大きさの違いである。被験者YIとHMは比較的大きな奥行きを知覚しているが、それ以外の3名の被験者が知覚した奥行き量はそれに比べるとかなり小さい。HAは、実験の際に、固視点を固視するのではなく、

視点を動かし輻輳を変化させた場合には知覚される奥行き量が増加すると報告している。両眼視差や運動視差のみでは大きな奥行きを知覚することができない被験者がそれ以外のどのような情報を用いて外界の3次元構造を認識しているのかという点については今度検討されるべき興味深い問題であると思われる。第2の点は、グラフの形状の違いである。Tyler³⁾は、両眼視差により知覚される奥行き量が最大になるのは、視差量が0.5 arc deg 付近の場合であり、それよりも大きい視差に対しては知覚される奥行き量が減少するとしている。本研究においてもそのような傾向を示す被験者も見られたが、一方では、6.5 arc deg までの視差の範囲において、知覚される奥行き量が単調増加の傾向を示す被験者も存在している。これらの被験者においてこの傾向がどのくらいの視差の大きさまで続くのかという点も今度検討されるべき興味深い問題であると思われる。ただし、被験者には固視点をしっかり固視することを再三確認したが、これらの被験者において固視が不十分であったという可能性も否定することができないので、今後はその点も確認する必要がある。

運動視差のみの条件(□)では、知覚された奥行き量は非常に小さかった。OnoとUjike⁶⁾は、本研究と同じ57cmの観察距離において視差量が10 arc min から1 arc deg のときに1~2 cm 程度の奥行きが知覚されたことを報告している。本研究においてもそのような傾向を示す被験者もいたが、ほとんど奥行きを知覚しない被験者もいた。OnoとUjikeは輝度変調の正弦波グレーティングを刺激として用いている。刺激パターンの違いにより結果に差が生じたのかもしれない。我々の用いた円形刺激は1色のグレーで描画されていたので、動きが1ピクセル単位の粗いものとなり、奥行きが知覚されにくかったのかもしれない。あるいは、彼らの刺激は4つの領域に分割され、隣り合う領域が互いに異なる奥行きをもっていたので、我々が用いたランダムドットパターンよりも有効に、テスト刺激自体が互いに参照刺激として機能したの

かもしれない。被験者の経験も重要な要素かもしれない。我々の実験に参加した被験者は心理物理実験の経験が少なく、特に運動視差による奥行きを評価することに慣れていなかった。いずれにしても、本研究で用いた実験条件は、運動視差のみではほとんど奥行きが知覚されない、あるいは非常に小さな奥行きしか知覚されない条件であったことがわかる。

両眼視差と運動視差の両方が与えられた条件(●)においても、両眼視差のみの場合と同様に知覚される奥行き量に個人差が見られるが、注目すべき点は、両眼視差と運動視差の両方が与えられた条件と両眼視差のみの条件(△)における知覚された奥行き量の違いである。非交差視差の条件では、●が△と同じかそれよりも上にプロットされている。特に視差量が大きい場合に、●が△よりも上にプロットされる傾向が顕著である。これは、両眼視差によって知覚される奥行き量が運動視差の効果によって増加することを示している。しかし、交差視差の場合には、被験者間で一貫した傾向は見られない。顕著な違いを示したのはKHのみであり、YIについてはむしろ逆向きの傾向を示している。

全体の傾向を分析するために、被験者5名の結果の平均値を計算した。先に述べたように被験者によって知覚された奥行き量の絶対的な大きさが大きく異なっていたので、Shimono, TamとNakamizo¹¹⁾と同様に、各被験者のデータをその被験者が知覚した奥行き量の最大値で正規化してから平均を計算した。図5に結果を示す。運動視差のみが与えられた条件(□)では、実験で用いたすべての視差の範囲において非常に小さな奥行きしか知覚されなかったが、両眼視差と運動視差の両方が与えられた場合(●)には、両眼視差のみが与えられた場合(△)よりも大きな奥行きが知覚される傾向があることがわかる。両眼視差のみが与えられた条件と両眼視差と運動視差の両方が与えられた条件において知覚された奥行き量の違いに関して、統計的な検定を行った。運動視差の有無と視差量の二要因の分散分析を行った結果、非交差視差の場

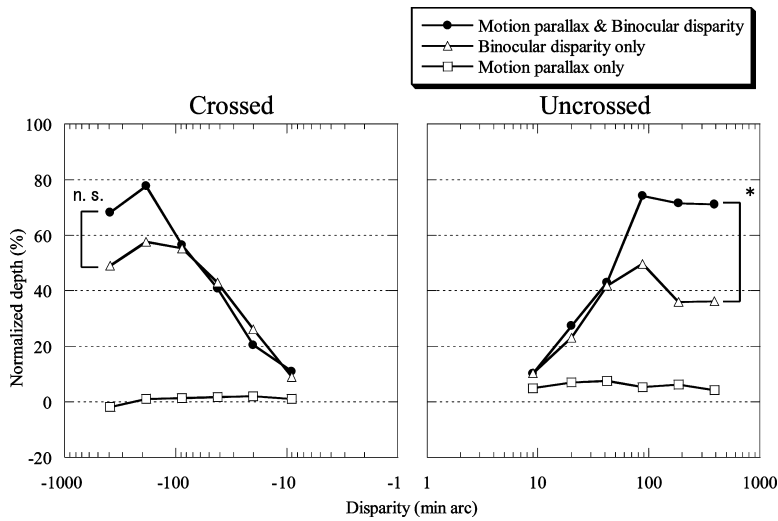


図5 両眼視差と運動視差により知覚された奥行き量 (5名の被験者の平均)。

合には、運動視差の有無によって生じた知覚された奥行き量の差が有意であることが示されたが $[F(1, 48)=5.814, p=0.020]$, 交差視差の条件では有意差は認められなかった $[F(1, 48)=0.623, p>0.05]$ 。

図6(a)に、運動視差のみが与えられた条件(□)と運動視差と両眼視差の両方が与えられた条件(●)において、テスト刺激の動きが知覚された割合を示す。テスト刺激の動きが知覚されたという応答が得られた試行の割合を被験者ごとに計算し、5名の被験者の平均値とその標準誤差を示した。左のグラフは交差視差、右のグラフは非交差視差の結果を表している。交差視差の条件では、実験で用いた視差の範囲において、ほぼすべての試行でテスト刺激の動きが知覚されたが、非交差視差の条件では、視差量が比較的小さい条件において、20~40%程度の試行で動きが知覚されないという応答が得られた。また、運動視差のみの条件(□)に比べて、運動視差と両眼視差の両方が与えられた条件(●)では、動きが知覚されたという応答が減少する傾向が見られた。モニタ上でのあるいは網膜上でのテスト刺激の運動の振幅は同じであるにもかかわらず、位相の違いによって、また、両眼視差を加えることによって動きが知覚され

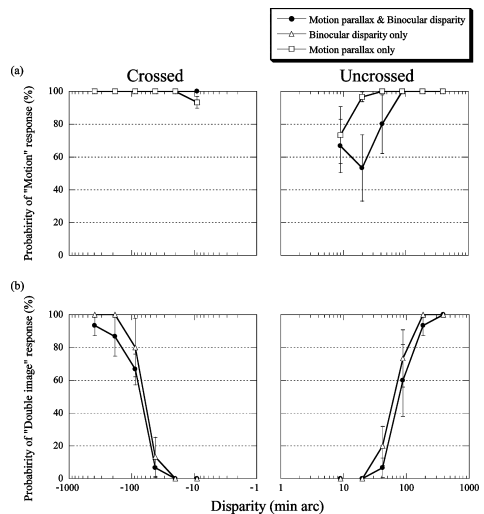


図6 (a) テスト刺激の動きが知覚された割合。(b) テスト刺激が二重像として知覚された割合。

にくくなるというのは興味深い結果である。知覚された奥行き量に関しても、非交差視差の場合には、運動視差と両眼視差が同時に与えられると単独の手がかりによる効果からは予測できない大きな奥行き量が知覚されるという相互作用が認められたが、網膜上での刺激パターンの動きが奥行きとして解釈されたことにより、動きの知覚が生じなかったと考えれば、これらの実験結果には一貫性があるということができる。

図 6(b) に、両眼視差のみが与えられた条件 (△) と両眼視差と運動視差の両方が与えられた条件 (●) において、テスト刺激が二重像として知覚された割合を示す。動きの知覚の場合と同様に、テスト刺激が二重像に知覚されたという応答が得られた試行の割合を被験者ごとに計算し、5名の被験者の平均値とその標準誤差を示した。両眼視差のみの条件 (△) に比べて、両眼視差と運動視差の両方が与えられた条件 (●) では、二重像が知覚されたという応答が減少する傾向が見られた。これは、運動視差が融像を促進することを示唆しており、興味深い結果である。しかし、今回実験で用いた円盤状の刺激パターンが二重像として知覚されたか融像したかという判断は必ずしも容易ではなかったと思われる。運動視差により積極的に融像が促進されたのではなく、刺激パターンが動くことにより、二重像として知覚されたという判断を下すことが難しくなり、結果としてそのような応答が減少しただけなのかもしれない。今後この可能性について詳細に検討する必要があると考える。

4. 考 察

本研究で用いた実験条件においては、運動視差のみが与えられた場合には、テスト刺激の動きが知覚され、大きな奥行きが知覚されることはなかったが、両眼視差と運動視差が同時に与えられた場合には、両眼視差のみが与えられた場合に比べて、より大きな奥行きが知覚される傾向が示された。

我々は、さまざまな手がかりによる奥行き情報を統合することにより外界を3次的に知覚していると考えられている。異なる情報を統合する様式として、重み付き平均という単純なモデルが統計学的にも合理的であり、かつ事実をよく説明するものとして注目されている¹²⁻¹⁵⁾。重みは情報の信頼性に比例し、信頼性はノイズによって変動する信号の分散に反比例するとされる。しかし、今回我々が得た結果は、情報の統合が常にそのような様式に従うわけではない

ことを示唆している点で興味深い。単独では奥行き情報として機能しない運動視差が両眼視差と同時に存在する場合にのみ奥行き情報としての効果をもつという本研究の実験結果は、重み付き平均という線型な情報統合モデルでは説明することができない。

Richards¹⁶⁾は、両眼視差と運動視差の統合に関係する幾何学的な定理を示している。一般に、頭部が静止した状態で物体を両眼で観察する場合、両眼視差から物体の3次元形状を計算するためには、物体までの距離や両眼間距離などの網膜外情報が必要である。頭部が運動している状態で物体を単眼で観察する場合にも、運動視差から物体の3次元形状を計算するためには、頭部運動に関する網膜外情報が必要である。しかし、両眼視差と運動視差が同時に与えられた場合、幾何学的には、物体までの距離や頭部運動と独立に網膜情報のみから物体の3次元形状を一意に決定できる場合がある¹⁶⁾。視覚系はこのような幾何学的な関係を利用して、両眼視差と運動視差から奥行き量を計算しているのかもしれない。一方、これまでの数多くの研究が示しているように、それぞれの手がかりが単独で与えられた条件でも奥行きが知覚されることから、奥行きが知覚されるために2つの手がかりが同時に与えられることが必要でないことも明らかである。本研究の結果は、2つの手がかりを用いて奥行きを計算するメカニズムの存在を示唆しているが、このメカニズムは、それぞれの手がかりを処理し網膜外情報を必要とするメカニズムと並列に機能しているのかもしれない。

大きな両眼視差に対して生じる奥行きの知覚は一過性の時間応答特性をもつことが知られている¹⁷⁻¹⁹⁾。ここで示された両眼視差と運動視差の非線型な相互作用はこの立体視の時間特性と関係があるかもしれない。両眼視差によって知覚された奥行きは、静的な刺激呈示の場合には時間の経過と共に奥行き量が減衰すると考えられるが、運動視差が与えられた場合には、刺激が動くことにより減衰が妨げられるのかもしれない。その場合には、刺激が動いていることだ

けが重要であり、動きの方向は効果の大きさと無関係であると考えられる。我々の観察によれば、運動の方向はやはり重要で、両眼視差と運動視差が矛盾する場合には運動の印象のみが強調され、奥行き知覚を促進する効果はあるとしてもごくわずかであるようだが、今後この点に関してもより詳細な検討が必要であると考え。

運動視差を加えた条件で知覚された奥行きが増大したのは、眼球運動が原因かもしれない。頭部が運動する場合、視点を一点に保つためには頭部運動を補償する眼球運動が必要であるが、この補償は不完全であり、被験者の自覚として融像が保持されていたとしても、輻輳が少なからず変化することが知られている。Steinman, Levinson, Collewijn と van der Steen²⁰⁾は 0.3~1.3Hz の頭部運動によって 0.5°~1° の輻輳の変化が生じることを報告している。頭部運動に伴う輻輳の変化により知覚された奥行き量が増大した可能性については、今後さらに検討する必要があると考える。

本研究で示された運動視差による立体視の促進効果は、非交差視差において顕著であり、交差視差では奥行き量の違いに有意な差は認められなかった。立体視が成立する視差量の上限に非対称性があり、交差視差よりも非交差視差のほうが上限が大きいことを示す研究が報告されているが^{18,19)}、本研究ではそのような非対称性を支持する結果は得られなかった。むしろ、被験者 HM と YI に見られるように、両眼視差によって知覚された奥行き量は交差視差よりも非交差視差において小さく、そのことが運動視差の効果の非対称性につながっているようにも見える。あるいは、本研究では、観察距離が 57 cm と比較的短かったので、頭部運動に伴う輻輳の変化が開散の方向においてより生じやすかったのかもしれない。また、本研究ではテスト刺激が必ず固視点の上に呈示されていたので、これが効果の非対称性の原因となっているのかもしれない。これらの要因について今後さらに検討を加える必要があると考える。

文 献

- 1) I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular vision and stereopsis. Oxford University Press, 1995.
- 2) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion. *Vision Research*, **35**, 389–412, 1995.
- 3) C. W. Tyler: Sensory processing of binocular disparity. *C. M. Schor and K. J. Ciuffreda (eds): Vergence eye movements: Basic and clinical aspects*. Butterworths, Boston, 199–295, 1983.
- 4) B. J. Rogers and M. E. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, **8**, 125–134, 1979.
- 5) H. Ujike and H. Ono: Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity. *Vision Research*, **41**, 2835–2843, 2001.
- 6) H. Ono and H. Ujike: Motion parallax driven by head movements: Conditions for visual stability, perceived depth, and perceived concomitant motion. *Perception*, **34**, 477–490, 2005.
- 7) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth. *Vision Research*, **36**, 3457–3468, 1996.
- 8) M. Ichikawa and S. Saida: Integration of motion parallax and binocular disparity at near depth threshold level. *Japanese Journal of Psychonomic Science*, **17**, 1–11, 1998.
- 9) M. Ichikawa and S. Saida: Integration of motion parallax with binocular disparity specifying different surface shapes. *Japanese Psychological Research*, **44**, 34–44, 2002.
- 10) M. Ichikawa, S. Saida, A. Osa and K. Munechika: Integration of binocular disparity and monocular cues at near threshold level. *Vision Research*, **43**, 2439–2449, 2003.
- 11) 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.
- 12) M. O. Ernst and M. S. Banks: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, **415**, 429–433, 2002.
 - 13) J. M. Hillis, M. O. Ernst, M. S. Banks and M. S. Landy: Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between, senses. *Science*, **298**, 1627–1630, 2002.
 - 14) M. S. Landy and H. Kojima: Ideal cue combination for localizing texture defined edges. *Journal of the Optical Society of America A*, **18**, 2307–2320, 2001.
 - 15) D. C. Knill and J. A. Saunders: Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant? *Vision Research*, **43**, 2539–2558, 2003.
 - 16) W. Richards: Structure from stereo and motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 343–349, 1985.
 - 17) K. Ogle: On the limits of stereoscopic vision. *Journal of Experimental Psychology*, **44**, 253–259, 1952.
 - 18) G. Westheimer and I. J. Tanzman: Qualitative depth localization with diplopic images. *Journal of the Optical Society of America*, **46**, 116–117, 1956.
 - 19) C. Blakemore: The range and scope of binocular depth discrimination in man. *Journal of Physiology*, **211**, 599–622, 1970.
 - 20) R. M. Steinman, J. Z. Levinson, H. Collewijn and J. van der Steen: Vision in the presence of known natural retinal image motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 226–233, 1985.