

## 奥行き運動知覚における両眼間速度差処理メカニズムの特性

懸樋 大介\*・塩入 諭\*\*・矢口博久\*\*

\* 千葉大学 大学院 自然科学研究科・\*\* 千葉大学 工学部 情報画像工学科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(受付 2001 年 2 月 15 日 ; 改訂受付 2001 年 6 月 4 日, 9 月 6 日 ; 受理 2001 年 9 月 20 日)

### Property of the Mechanism Processing Inter-ocular

### Velocity Differences to See Motion in Depth

Daisuke KAKEHI\*, Satoshi SHIOIRI\*\* and Hirohisa YAGUCHI\*\*

\* Graduate School of Science and Technology, Chiba University

\* Department of Information and Image Science, Chiba University

1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

(Received 15 Feb 2001 ; Received in revised form 4 Jun 2001 and 6 Sep 2001; Accepted 20 Sep 2001)

There are two binocular cues for perception of motion in depth. One is binocular disparity changes in time and the other is velocity differences between the left and right retinal images (inter-ocular velocity differences). We investigated the effect of motion direction in a front-parallel plane and temporal frequency on the perception of motion in depth based on inter-ocular velocity differences. We found first that 2-D horizontal motion influenced motion in depth perception more than 2-D vertical motion, and second that inter-ocular velocity differences was useful for motion in depth stimulus up to about 5 Hz. These results suggest that inter-ocular velocity differences are useful to see motion in depth within median plane and at high speeds.

#### 1. はじめに

我々の視覚系は、3次元の世界を認識するために様々な手がかりを利用している。それらの手がかりを検出するための視覚系のメカニズムについて、多くの知見が蓄積されてきた<sup>1)</sup>。しかし、その多くは静止刺激を対象とし

ており、3次元空間での運動知覚に関しては限られた手がかりについてのみ詳細な研究がなされている<sup>2,3)</sup>。Regan と共同研究者らは精力的に奥行き運動知覚に関する心理物理学実験を行い、両眼性手がかりと網膜像の大きさ変化による単眼性手がかりの役割について検

討してきた。観察者に対してまっすぐに接近してくる物体を想定する場合、眼球運動がないとすると、その左右眼網膜像は拡大しながら水平方向に反対向きに動く。彼らはこのとき網膜像のサイズ変化に起因する単眼性手がかり<sup>4)</sup>でも、両眼網膜像差に起因する両眼性手がかり<sup>5)</sup>でも奥行き運動知覚が可能であることを明らかにしている。

奥行き運動に対する両眼性手がかりは、理論的に2種類存在する<sup>6)</sup>。ひとつは両眼視差の時間的変化（以下、視差変化）であり、もうひとつは両眼網膜像間の速度差（以下、両眼間速度差）である。これら2つの手がかりを分離した刺激を用いた実験から検討され、いずれか一方の手がかりでも奥行き運動知覚が可能であることが示されている。Julesz (1971)<sup>10)</sup>とNorcia & Tyler (1984)<sup>11)</sup>は時間的に相関のないダイナミックランダムドットステレオグラムを用いて、左右眼網膜像から運動情報を取り除き、両眼視差のみが時間的に変化する刺激を作成した。このような刺激に対しても奥行き運動知覚が可能であることから、両眼視差の時間的変化だけでも奥行き運動知覚が可能であることがわかる。一方、Maedaら(1999)<sup>8)</sup>とShioiriら(2000)<sup>9)</sup>は左右眼で相関のないランダムドットパターンによって両眼視差情報を取り除き、両眼網膜像間の速度差のみを含む刺激に対する奥行き運動の検出能力を測定した。これらの結果は、両眼間速度差のみでも奥行き運動知覚が可能であることを示した。

視差の時間的変化、両眼間速度差の両者が奥行き運動の手がかりとして利用されているとすると、両者は相補的な機能をもっているであろうか。それとも重複した機能を担い、精度を上げているのみであろうか。いくつかの研究は、奥行き運動知覚に対する2つの両眼性手がかりの寄与の大きさについて報告している。Cumming & Parker (1994)<sup>7)</sup>は、2つの両眼性手がかりを含む場合と視差変化のみを含む場合の奥行き運動検出の感度を比

較しほぼ同じであることを示した。またPortfors-Yeomans & Regan (1997)<sup>12)</sup>とPortfors & Regan (1997)<sup>13)</sup>は2つの両眼性手がかりを含む刺激と視差変化のみを含む刺激を用いて速度弁別および方向弁別閾値を測定し、単眼性運動情報の有無によらず弁別閾値はほぼ同じであることを示した。これらの実験結果からは、奥行き運動の知覚に対しては視差変化が支配的な役割を果たし、両眼間速度差の寄与は小さいとの結論が導かれている。その一方で、奥行き運動の検出に対しても速度弁別に対しても両眼間速度差の重要性を示す条件が見いだされている。Shioiriら(2000)<sup>9)</sup>の実験2は、左右眼刺激の垂直方向のずれを変化させて、奥行き運動の検出能力を測定した。その結果は、視差変化より両眼間速度差の方が大きなずれに対しても感度を保つことを示し、両眼間速度差の方が広い足し合わせ範囲を持つことを示唆している。Harris & Watamaniuk (1996)<sup>14)</sup>は、2つの手がかりを含む条件と視差変化のみを含む条件で水平方向の運動に対する速度弁別閾値を測定し、視差変化のみの条件では速度弁別能力が低いことを示した。またBrooks & Mather (2000)<sup>15)</sup>は、単眼性運動と2つの手がかりを含んだ奥行き運動に対する知覚される速度の視野依存性が類似していることを示し、奥行き運動知覚において単眼性の速度情報が影響していると主張した。これらは両眼間速度差の奥行き運動知覚への寄与が必ずしも小さいとは言えないことを示しており、2つの手がかりに対する感度が条件によって変化することを示唆している。本研究では両手がかりの検出メカニズムから予測される特性の差異に注目し、両眼間速度差を検出するメカニズムの役割について検討する。

視差の時間的変化と両眼間速度差はその検出メカニズムにおいても異なっていると考えられる<sup>7)</sup>。図1にそのモデルを示す。視差変化メカニズムは視差検出器の出力を時間微分するメカニズムであるのに対して、速度差メカニズムは各眼の網膜像の水平方向の運動成

分の差を計算するメカニズムである。前者の処理にはそれぞれの網膜上の運動成分は不要であるし、後者では両眼視差が不要である。但し後者でも速度を比較する網膜対応位置は何らかの方法で決定されている必要がある。

このようなモデルを考えると、2つの手がかりの検出特性において、少なくとも2つの違いが予想される。1つは運動方向の影響である。3次元空間での運動方向は、奥行き方向の成分と2次元平面（前額平行面）内の成分の組み合わせによって表すことができる。視差変化メカニズムは運動検出メカニズムとは独立に働くことから、視差変化による奥行き運動の検出能力は前額平行面内の運動方向の影響を受けないことが予想される<sup>6)</sup>。つまり、水平方向に運動しながら近づいてくる場合と垂直方向に運動しながら近づいてくる場合との間に、奥行き運動の検出感度の差が生じないと考えられる。一方、両眼間速度差メカニズムは運動検出メカニズムとは独立ではないため、その奥行き運動の検出は前額平行面内の運動成分に影響されることが予想され

る。一般に速度差の検出閾値は比較する速度の共通成分によって上昇することが知られていて<sup>16)</sup>、両眼間速度差においても両眼間で共通する水平方向の運動成分の増加はその検出感度を低下させることが予想される。垂直方向の運動成分の増加については、両眼間速度差の検出に対してそのような直接的な影響は考える必要がないので、感度の低下があったとしても水平方向の運動成分に比べて効果は小さいであろう。従って速度差メカニズムは垂直方向に運動しながら奥行き運動する刺激に対して高い感度を持っている可能性がある。

2つめは時間周波数の影響である。視差検出は時間のかかる処理であると考えられているのに対して<sup>17)</sup>、運動検出の時間特性は高い時間解像度を持つと考えられる。したがって運動検出の結果を使う速度差メカニズムは、視差検出の結果を使う視差変化メカニズムより高い時間周波数、すなわち速い奥行き運動の検出に有利であることが予想される。我々はこの2点に注目し、奥行き運動の検出において両眼間速度差が有効に働く刺激条件について検討した。

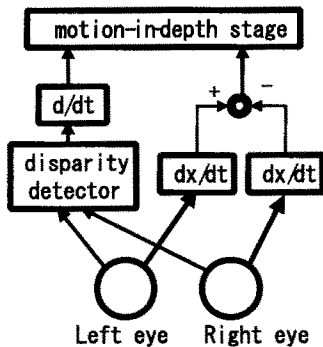


図1 奥行き運動知覚のための2つの両眼性メカニズム。左側の経路は両眼視差の時間的変化を検出するメカニズム、右側の経路は両眼間速度差を検出するメカニズムのモデルを示す。  
Two possible binocular mechanisms for perception of motion in depth. The left side of the diagram illustrates the model of the mechanism to detect binocular disparity changes in time and the right of the diagram illustrates the model of the mechanism to detect inter-ocular velocity differences.

## 2. 実験1

### 2.1 目的

速度差メカニズムは2次元の運動検出と独立でないため、前額平行面内の運動方向が水平である条件と垂直である条件とでは奥行き運動の検出能力が異なることが予想される。ここでは、水平および垂直面内で奥行き方向に回転運動する刺激を用い、両眼間速度差に基づく奥行き運動の検出能力と視差変化に基づく奥行き運動の検出能力を比較することを目的とする。実験刺激として、両眼間速度差を分離した条件（速度差条件）および視差変化を分離した条件（視差条件）の2条件を用いた。

### 2.2 刺激

想定した刺激の3次元軌道の網膜像は、図

2に示すように奥行き運動成分と前額平行面内の運動成分の2つの運動成分の線形和として制御することができる。奥行き運動成分(図2(a))は左右眼で反対方向に同速度で運動する成分であり、前額平行面内の運動成分(図2(b))は左右眼で同じ方向に同速度で運動する成分に相当する。

2つの両眼性手がかりはランダムドットパターンを用いて分離することができる。ランダムドットステレオグラムを用いて、左右眼刺激を水平方向に互いに反対向きに動かすと、実際に3次元の面を奥行き方向に動かした場合と同様に、両眼視差の時間的変化と両眼間速度差の手がかりを含む刺激となる。もちろん大きさの変化も含め、ほかの手がかりはない。ここで左右眼のランダムドットパターンを相関のないものに変え同様の動きを与えると、両眼対応点がないため両眼視差手がかりは排除され、両眼間速度差のみを含む刺激となる<sup>8,9)</sup>。単眼で観察するとき2次元の運動が見え、両眼で観察するとき奥行き運動が知覚される。一方、時間相関のないランダムドットステレオグラムを用いて、左右眼網膜像の前額平行面内の運動成分を排除し、視差の時間的変化のみを含む刺激を作ることが可能である。この刺激を単眼で観察するときドットがランダムにちらついているだけに見えるが、両眼融合すると奥行き運動を知覚で

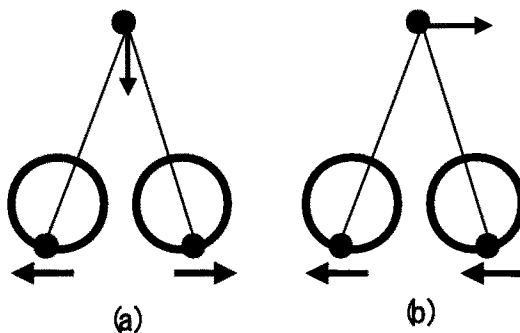


図2 3次元空間を運動する物体に対する網膜像の運動；(a)奥行き運動 (b)前額平行面内の運動。  
Schematic diagrams of the retinal images of an object moving in 3-D space: (a) Motion in depth and (b) motion in a front parallel plane.

きる。

速度差条件の刺激としては、水平あるいは垂直面内で奥行き方向の回転運動を模擬し、そこから左右眼画像間の相関を排除した。水平および垂直回転刺激の概略を図3に示す。水平回転刺激では、前額面に平行なランダムドットパターンで構成された刺激の上下半分の面が、注視点を通る垂直軸まわりに、それぞれ額面平行を保った状態で奥行き回転運動する(図3(a))。同様に垂直回転刺激では、刺激の左右半分の面が注視点を通る水平軸まわりに、それぞれ額面平行を保った状態で奥行き回転運動する(図3(b))。これらの刺激の上下半分あるいは左右半分は回転方向は同じだが、180度の位相差を保って回転している。回転が知覚されるときには2つの面が回転しているように見え、例えば上(または左)半分が手前にあるように見える瞬間には、下(または右)半分が奥にあるように見える。奥行き回転運動を用いた理由は、単眼網膜像の動きから奥行き運動を推定することを防ぐためである。水平回転刺激の各ドットの単眼網膜像は左右に振動するため、単眼網膜像から奥行き運動の方向を推定することはできない<sup>9)</sup>。垂直回転刺激に対するこの問題については後述する。また各ドットは静止した正方形の枠の中にあり、一方の端を越えたドットは他方の端から現れるように処理されている。従って刺激される網膜部位は運動方向によって変わらない。刺激は上下または左右半分の間で相対運動成分を含むものとしたのは、奥行き運動知覚には相対運動成分が不可欠であると報告されている<sup>10)</sup>ためである。

視差条件では、視線方向の前後運動が知覚される刺激を用いた。速度差条件と同様に回転運動を用いなかった理由は、前額平行面内に運動成分を加えることができないことによる。視差で定義された図形に水平あるいは垂直方向の運動を与えることで、奥行き回転運動を与えることは可能である<sup>13)</sup>が、2次の特徴の変化となり、速度差条件と比較すること

はできない。視差条件の刺激では、図3(c)に示すように、上下半分が互いに反対方向に前後運動が知覚される。被験者には二間隔二者強制選択 (two interval two alternative forced choice) によって、前後運動刺激とダイナミックランダムノイズ刺激を弁別する課題が課せられた。ダイナミックランダムノイズ刺激では、前後運動刺激の視差範囲と同じ体積のなかに散らばったドットがランダムな方向に動く。そのため単眼で観察するとき両者の見えは同じであり、区別がつかない。

速度差条件の回転刺激の回転速度は 2.8 rps (round per second) とした。視差条件の前後運動刺激では時間周波数で同等となる 2.8 Hz を使い、速度変化も正弦波状とした。奥行き変化の量は±16分の視差範囲として、速度差条件ではそれに対応する運動を与えた。回転刺激の水平、垂直方向の回転半径は 21, 43, 85 分の 3 種類を用いた。

### 2.3 装置

実験装置は 2 台のモノクロモニター (Nanao FlexScan 6500, 67 Hz) と鏡で構成されるステレオスコープであった。刺激は図 4 のような 1 辺 4.3 deg のランダムドットパターンで、パーソナルコンピュータ (Apple Power Macintosh 7100/80AV) によって生成された。

刺激は 256 × 256 画素 (1 画素 = 1 分) で構成され、背景輝度は 46 cd/m<sup>2</sup> であった。そのなかに 60 cd/m<sup>2</sup>, 1 辺 4 分のドット 400 個 (約 10%) がランダムに分布した。ドットと背景の間のウェーバーコントラスト ( (ドットの輝度 - 背景輝度) / 背景輝度 ) は 0.3 で一定とした。観察者は鏡を通して視距離 1.6 m の 2 台のモニター上の刺激を観察、融合した。

### 2.4 手続き

被験者は顎台で頭部を固定し、図 5 に示すようなノニアス刺激を観察した。被験者は、ノニアス刺激によって輻輳が注視面に固定されたことを確認し、キーボードによって合図するように指示された。合図によってノニアス刺激は消え刺激が呈示される。速度差条件では回転運動刺激が 0.7 秒間呈示された後、再びノニアス刺激が呈示された。刺激の回転方向と回転開始位置が試行毎にランダムに設定され、被験者はキーボードによって回転方向を応答した。視差条件においては、前後運動刺激とダイナミックランダムノイズ刺激が用意され、0.7 秒の時間間隔を挟んで各 0.7 秒ずつ呈示された後、再びノニアス刺激が呈示された。被験者はどちらのインターバルに前後運動が知覚されたかを応答した。2 つの刺激呈示の間にもノニアス刺激が呈示された。1

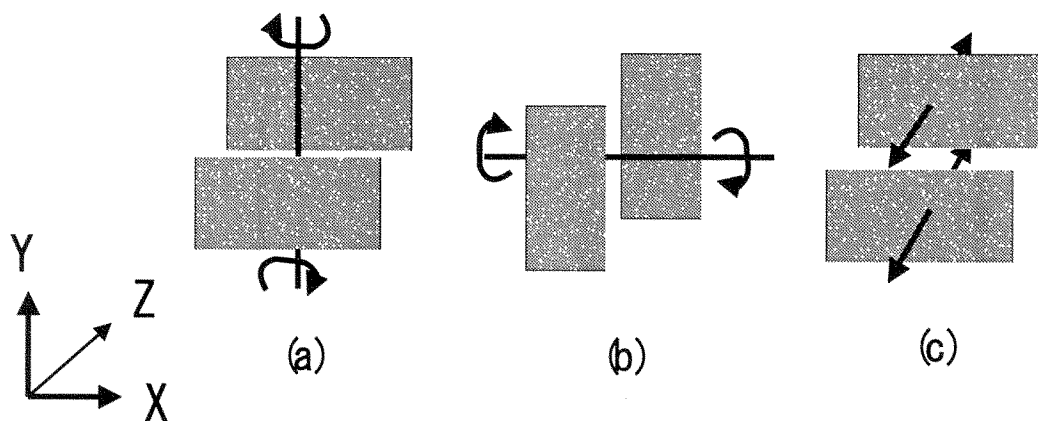


図 3 刺激の運動の概略。(a)水平回転 (b)垂直回転 (c)前後運動。

Schematic diagrams of the stimulus movements: (a) Rotation in a horizontal plane, (b) rotation in a vertical plane and (c) oscillation in depth.

セッション 24 試行中では、回転軸、手がかり、水平または垂直方向の振幅は変化しない。各被験者は各条件で最低 2 セッションの実験を行った。

### 2.5 実験結果

図 6 に各条件に対する被験者 5 名の正答率の平均を示す。横軸は水平あるいは垂直方向の振幅を示す。白丸は水平回転、黒丸は垂直回転の結果を表す。視差条件の前後運動の検出の正答率は振幅 0 に対応するが、水平線（破線）で表す。

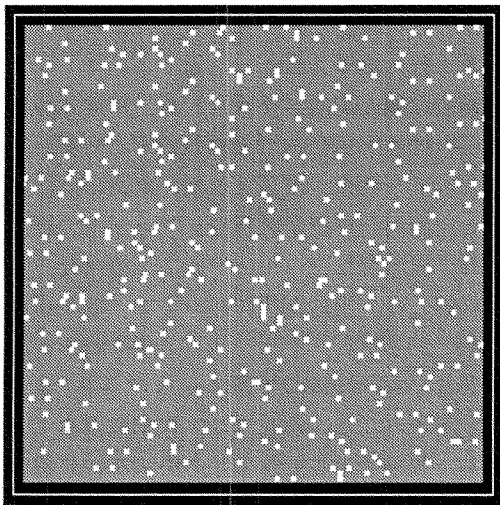
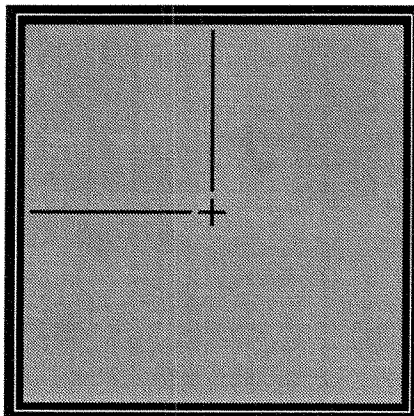


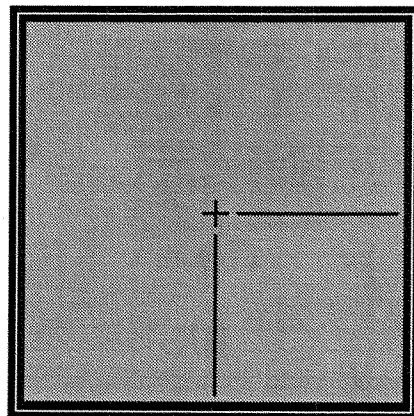
図 4 刺激のパターン。  
A schematic view of the stimulus pattern.

まず両眼間速度差の検出に対する両眼間の共通速度成分の影響に注目する。水平回転では最小の振幅で 80 % 程度の正答率であったが、振幅の影響を強く受け、最大の振幅でほぼ 50 % のチャンスレベルまで低下した。一方、垂直回転においては、振幅の増加に伴う正答率の低下は 95 % 程度から 90 % 程度への約 5 % である。左右眼の共通速度成分は回転運動の振幅に比例する。従ってこの結果は両眼間の水平方向の共通速度成分の増加が速度差検出の感度を低下させるという予測に一致する。前額平行面内の速度成分に依存した感度の差は、両眼間速度差の検出能力が水平方向の両眼共通速度成分の影響を受けるためであると説明できる。

次に各条件での検出能力を比較する。視差変化の検出の正答率は 80 % 程度であるが、両眼間速度差による垂直回転の検出の正答率は 100 % に近い。水平回転では水平方向の振幅が小さい場合、視差変化の検出の正答率と同等で 80 % 程度であるが、振幅の増加に従って正答率は低下している。垂直回転の正答率が最も高く、我々の用いた実験条件が視差条件よりも速度差条件で優位となる条件であった可能性を示す。速度差条件と視差条件では実験課題が異なるため、正答率の直接的な比較



(a)



(b)

図 5 ノニウス刺激。A schematic view of the nonius lines.

はすべきでないが、ここでの課題の差は視差条件の方が正答率が高くなることが予想される。なぜなら、視差条件では奥行き運動の検出課題、速度差条件ではその弁別課題であり、弁別課題は奥行き運動を検出した後、あるいはそれと同時にを行うことのできる課題だからである。この点を考慮すると、これらの結果は両眼間速度差は視差変化より有利な手がかりとなりうることを示唆する\*。

### 3. 実験2

#### 3.1 目的

実験2では速度差条件と視差条件の時間特性に注目する。一般に運動検出は速い処理、両眼立体視は時間のかかる処理と考えられている。したがって速度差メカニズムは、視差変化メカニズムに比べて高時間周波数領域で有利に働くことが予想される<sup>3)</sup>。この点を検討するために、各手がかりに基づく奥行き運動知覚への時間周波数の影響を比較する。

#### 3.2 刺激と手続き

刺激、手続きともに実験1と同じである。ただし、水平および垂直方向の振幅は21分に固定し、速度差条件の回転運動では回転速度を1.4, 2.8, 5.6, 8.4 rpsの4種類に変化させた。視差条件では前後運動の時間周波数であり1.4, 2.8, 5.6, 8.4 Hzに対応する。各時間周波数での測定は異なるセッションで行われた。被験者は実験1と同じ5名であった。

#### 3.3 実験結果

実験結果を図7に示す。横軸は回転速度あ

---

\* 視差条件と速度差条件では課題だけでなく刺激も異なるが、ここでは実際の運動を模擬した刺激から一方の手がかりを排除した刺激を用いることで、手がかりの比較を行うという立場をとった。また速度差条件では、水平回転と垂直回転で刺激の分割方向が異なっているが、これは境界と運動方向の関係を同じに保つためである。これらの条件の差は感度の絶対値を比較する場合には注意すべき点であり、本実験においても上述の点を考慮した上での比較である。

るいは前後運動の時間周波数を示し、縦軸には被験者5名の正答率の平均を示す。いずれの条件においても時間周波数が高くなるに従って正答率は低下したが、低下の傾向は条件に依存した違いがみられた。視差条件では、1.4 Hzから周波数の増加に伴い正答率は急激に低下し、速度差条件では水平回転で2.8 Hz以上、垂直回転で5.6 Hz以上で正答率の低下が顕著となった。これらの結果は、速度差条件では、視差条件より高い時間周波数まで感度が低下しないことを意味する。

水平回転と垂直回転を比べると、いずれも50%の正答率となる周波数が8.4 Hzという点で一致している。このことから両条件の時間周波数特性は、ほぼ同じであると考えられる。ただし1.4 Hzでの正答率がそれぞれ100%と80%との差があるため、正答率の変化からは単純に比較することはできない。詳細な検討のためには両条件の感度を測定し、その周波数特性を比較する必要がある。垂直回転より水平回転の正答率が低いことは、実験1の場合と同様であり、両眼間の共通速度成分の影響であると考えられる。従って、速度差条件の水平回転と視差条件は高時間周波数領域では、同程度の検出能力を示しているが、速度差条件と視差条件の感度が一致していることを意味するわけではない。奥行き運動の信号に関する限り、高時間周波数領域では両眼間速度差が視差変化よりも有効であると考えられる。

### 4. 考察

奥行き運動に関する2つの両眼性手がかりの差異を検討するために2つの実験を行った。これらの実験は両眼間速度差による奥行き運動知覚の特性について、次の2点を明らかにした。ひとつは前額平行面内での運動すなわち左右眼での共通速度成分の影響であり、もうひとつは時間周波数の影響である。

#### 4.1 左右眼の共通速度成分の影響

実験1では両眼間速度差による奥行き運動

はその運動方向によって検出能力に違いが生じることを示した。回転軌道の振幅の増加は、左右眼網膜像で同じ方向に運動する成分の増加に相当する。水平回転刺激では水平方向の振幅の増加に従い正答率は低下した。左右眼で同じ方向に運動する成分の増加が、左右眼で反対方向に運動する成分の検出を困難にしたと考えられる。これは例えば速度差の検出において共通速度成分がないとき最も感度が高く、ある速度を超えると共通速度成分の増加に伴い感度が低下すること<sup>16)</sup>から予測される。両眼間速度差の検出において、検出すべき両眼間の水平方向の共通速度成分が増加するとき検出感度が低下することは、図1のモデルと一致する。

#### 4.2 時間周波数特性

実験2では速度差条件では高時間周波数領域での検出能力の低下が、視差条件より高周波側で起こることを示した。この結果は、視

差変化メカニズムが速度差メカニズムに比べて時間解像度が低いことを示唆し、視差の検出は時間がかかる処理であるとの考えと一致する。立体視力への時間的な足し合わせの効果測定した実験によると、両眼視差の足し合わせ時間は100ミリ秒から1秒の間にばらついている<sup>17)</sup>。このことから両眼立体視の形成において、数百ミリ秒程度は視差信号の加算を行っていることが予想される。また奥行き方向の前後運動刺激を用いた実験では、時間周波数が6 Hz程度まで奥行き方向の運動として検出できることが知られている<sup>18)</sup>。一方、運動検出に関しては高い時間解像度を持つことが知られていて、運動検出に対するコントラスト感度の時間特性は8 Hz付近にピークをもつ帯域通過型であることが知られている<sup>19)</sup>。これらの報告は、奥行き運動知覚のための速度差メカニズムは視差変化メカニズムより高い時間解像度をもつという実験2で示した時

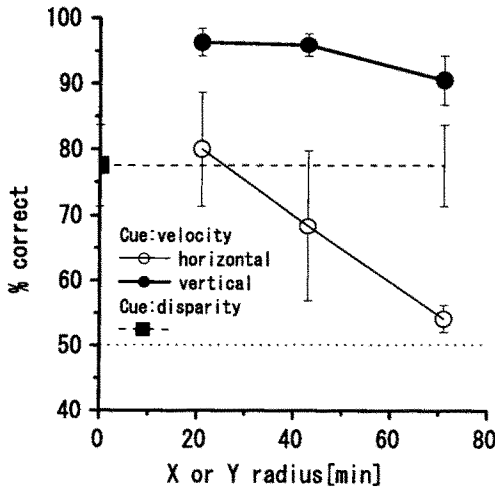


図6 奥行き回転の方向弁別課題の正答率。水平軸は、回転運動の水平あるいは垂直方向の半径を示す。誤差棒は被験者5名の標準誤差を示す。

Percentage of the correct responses for identifying the direction of the rotation in depth. Horizontal axis represents the horizontal or vertical radius of the path of the rotation. Error bar indicates the standard error across 5 observers.

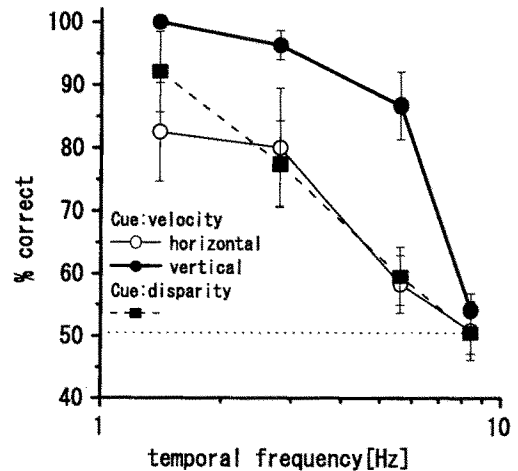


図7 奥行き回転の方向弁別課題（速度差条件）と奥行き運動の検出課題（視差条件）の正答率の時間周波数特性。誤差棒は被験者5名の標準誤差を示す。

Percentage of the correct responses for identifying the direction of the rotation in depth (the velocity condition) or the detection of oscillation in depth (the disparity condition) as a function of temporal frequency. Error bar indicates the standard error across 5 observers.



間特性と定性的に一致する。

しかし実験2の結果と運動検出の時間特性を比較すると定量的には一致するとは言えない。実験2の速度差条件では8 Hzですでに大きな感度低下を示しており、2次元の運動検出器の特性がそのまま両眼間速度差による奥行き運動の検出に反映しているとは考えにくい。両眼間で水平方向に反対向きの運動を与えるとき、単眼視で運動が知覚される場合でも、両眼視では運動が知覚されない条件があるとの報告がある<sup>20</sup>。これは奥行き運動知覚において、両眼間の運動情報が逆向きである場合には、運動に対する感度が抑制されることを示す現象である。本実験での速度差条件の高時間周波数での感度低下の一因としても、この抑制効果が考えられる。このような抑制効果は日常生活で体験する奥行き運動を考えてみると、妥当なものである。例えば、視差16分の振幅、時間周波数8 Hzで運動する刺激は、視距離1.6 mに対して、奥行き方向の最大速度は約28 km/hourであるが、水平方向には約1.5 km/hourであり、全くその意味が異なる。前者は通常は見られない刺激であるのに対し、後者は日常的な刺激の範囲にある。このように考えると、奥行き運動知覚のための速度差メカニズムの高時間周波数での感度の低下は理にかなった特性と言える。

#### 4.3 先行研究との比較

奥行き運動知覚への両眼間速度差の貢献は小さいとの報告<sup>7,12,13</sup>がいくつかある。その原因のひとつとして、時間周波数特性の影響が考えられる。Portforsら<sup>12,13</sup>の刺激は視差変化率で毎秒9分から18分の速度であり、これは我々の刺激の1 Hz以下に対応する。実験2の結果(図7)から低時間周波数であるほど視差条件は優位になると推測でき、彼らの刺激では視差変化が優位であったことを説明できる。Cummingら<sup>7</sup>は、時間周波数を変化させて、手がかりが視差変化のみの条件と両眼間速度差もある条件の比較をしているが、彼らの結論は主に2 Hz以下の結果から導かれて

いる。彼らの実験結果<sup>7</sup>(Fig.3)の4 Hzでは速度差手がかりを含む条件において相対的な感度上昇が見られ、速度差手がかりの奥行き運動知覚への寄与の増加を示している。ただしCummingら<sup>7</sup>はどのように刺激条件を設定しても、両眼間速度差だけでは奥行き運動知覚が全く不可能であったとも報告しており、時間周波数以外に刺激の形状や被験者による感度差などの影響も考えられる。ちなみに、彼らは両眼間速度差のみを含む刺激に対する感度の測定は、単眼網膜像の運動手がかりの排除が難しいことから行っていない。我々は回転運動を用いてこの問題を回避している。

#### 4.4 垂直回転刺激の方向弁別課題における被験者の応答の妥当性についての検討

垂直回転刺激を用いた実験では、被験者は回転方向を奥行き回転の知覚に基づいて判断したと仮定したが、刺激には別の手がかりも含まれている。垂直回転刺激を単眼で観察する場合、ランダムドットパターンの運動は前額平行面内で楕円軌道をもつ回転運動であり、両眼間では互いに逆向きに回転している。網膜像の運動方向とそれがどちらの眼の情報であるかがわかれば、奥行き回転方向を推定することも原理的に可能となる。この場合、被験者は奥行き運動を知覚していなくても、回転方向を正答できることを否定できない。被験者が垂直回転刺激に対して奥行き運動を知覚しているかを検証するために補足実験を行った。

テスト刺激として先の実験で用いたものと同じ垂直回転刺激を用いた。この刺激では左右眼刺激の運動方向は逆向きである。一方、ダミー刺激として、単眼網膜像の運動は垂直回転刺激と同じであるが、左右眼で同じ運動方向をもつ刺激を用いた。奥行き運動が知覚されていれば、両者は容易に弁別できるはずである。

この刺激を用いて、被験者がテスト刺激とダミー刺激を弁別できるかどうかを調べた。それぞれには運動方向の異なる2種類があ

り，従ってテスト刺激とダミー刺激の組み合わせは計4種類ある．各試行毎にテスト刺激とダミー刺激の組み合わせのうちの1つがランダムに選ばれ，0.7秒の時間間隔をはさんで各0.7秒ずつ呈示された．被験者は2つの刺激が呈示された後，どちらの刺激に奥行き回転が知覚されたかを選ぶ二間隔二者強制選択課題を行い，その正答率を測定した．もしいずれの刺激にも奥行き回転運動が知覚されたならば，知覚された奥行き運動の大きい方を応答するように教示した．被験者は実験1,2と同じ5名である．テスト刺激には回転速度1.4 rps，垂直方向の振幅21分，奥行き方向の振幅16分の垂直回転刺激を用いた．被験者5名の正答率は平均で91.6%（最低79.7%，最高98.4%）であった．被験者はテスト刺激とダミー刺激を区別できることから，この実験条件において奥行き方向の回転が知覚できることがわかる．この結果は，奥行き回転の運動方向から応答していることを支持する．しかし前額平行面内の回転運動から応答していないことについては議論の余地がある．

## 5. 結論

奥行き運動知覚の2つの両眼性手がかりを分離した条件において，両眼間速度差が垂直方向の運動成分の影響を受けにくい手がかりであること，5 Hz 付近の時間周波数まで感度をもつ手がかりであることを示した．この結果は，奥行き運動知覚において両眼間速度差は垂直運動を伴う場合や高速の対象に対して重要な手がかりであることを示唆する．本研究の実験結果は実験刺激と課題の違いによって，刺激条件間の結果を直接比較することが難しい．今後これらの点を検討し，2つの両眼性手がかりを比較する必要がある．

謝辞 本研究は（財）放送文化基金の助成のもとに行われた．

## 文 献

- 1) 中溝幸夫, 下野孝一, 塩入 諭, 近藤倫明, 近江政雄: 奥行き (立体) 視. 日本視覚学会 (編): 視覚情報処理ハンドブック, 283-333, 朝倉書店, 2000.
- 2) D. Regan: Depth from motion and motion-in-depth. *D. Regan (eds): Vision and visual dysfunction vol. 9*, 137-160, MacMillan, London, 1991.
- 3) S. Shioiri, A. Morinaga, A. Nakajima, D. Kakehi and H. Yaguchi: Binocular depth perception for moving images. *Proceedings of SPIE CR76*, in print, 2000.
- 4) K. I. Beverley and D. Regan: Separable aftereffects of changing-size and motion-in-depth: different neural mechanisms? *Vision Research*, **19**, 727-732, 1979.
- 5) K. I. Beverley and D. Regan: Evidence for the existence of neural mechanisms selectively sensitive to the direction of movement in space. *Journal of Physiology*, **235**, 17-29, 1973.
- 6) D. Regan: Binocular correlates of the direction of motion in depth. *Vision Research*, **33**, 2359-2360, 1993
- 7) B. G. Cumming and A. J. Parker: Binocular mechanisms for detecting motion-in-depth. *Vision Research*, **34**, 483-495, 1994.
- 8) M. Maeda, M. Sato, T. Ohmura, Y. Miyazaki, A. Wang and S. Awaya: Binocular depth-from-motion in infantile and late-onset esotropia patients with poor stereopsis. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **40**, 3031-3036, 1999.
- 9) S. Shioiri, H. Saisho and H. Yaguchi: Motion in depth based on inter-ocular velocity differences. *Vision Research*, **40**, 2565-2572, 2000.
- 10) B. Julesz: Foundations of cyclopean perception. Chicago University Press, Chicago, 1971.
- 11) A. M. Norcia and C. W. Tyler: Temporal frequency limits for stereoscopic apparent motion processes. *Vision Research*, **24**, 395-401, 1984.
- 12) C. V. Portfors-Yeomans and D. Regan: Discrimination of the direction and speed of motion in depth of a monocularly visible target from binocular information alone. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 227-243, 1997.
- 13) C. V. Portfors and D. Regan: Just-noticeable difference in the speed of cyclopean motion in depth and the speed of cyclopean motion within a frontoparallel plane. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 1074-1086, 1997.

- 14) J. M. Harris and S. N. Watamaniuk: Speed discrimination of motion-in-depth using binocular cues. *Vision Research*, **35**, 885-896, 1995.
- 15) K. Brooks and G. Mather: Perceived speed of motion in depth is reduced in the periphery. *Vision Research*, **40**, 3507-3516, 2000.
- 16) K. Nakayama: Differential motion hyperacuity under conditions of common image motion. *Vision Research*, **21**, 1475-1482, 1981.
- 17) K. I. Beverley and D. Regan: Visual sensitivity to disparity pulses: evidence for directional sensitivity. *Vision Research*, **14**, 357-361, 1974.
- 18) C. J. Erkelens and H. Collewijn: Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereogram. *Vision Research*, **25**, 583-588, 1985.
- 19) D. H. Kelly: Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surface. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1340-1349, 1979.
- 20) C. W. Tyler: Stereoscopic depth movement: Two eyes less sensitive than one. *Science*, **24**, 958-961, 1971.