

# 奥行運動刺激に対する両眼立体視特性の検討

代表研究者 塩 入 諭 千葉大学助教授

## 目 的

3次元映像の表示技術の進歩は目覚ましく、実用的なシステムも多く開発されている。一方、快適な観賞や効率的な立体情報の表示のためには、人間の視覚特性を十分に考慮することが重要である<sup>1,3</sup>。立体視機能に関する研究は視覚研究の中心問題のひとつであり、多岐にわたる成果が得られている。しかし、その多くは静止画像を対象としたものであり<sup>4</sup>、動画の立体表示について考えるときには不十分である。運動対象についての立体視特性についての検討が不可欠である。本研究では奥行運動に注目し、3次元の運動情報が視覚系によっていかに処理されているかについての調査を目的とする。

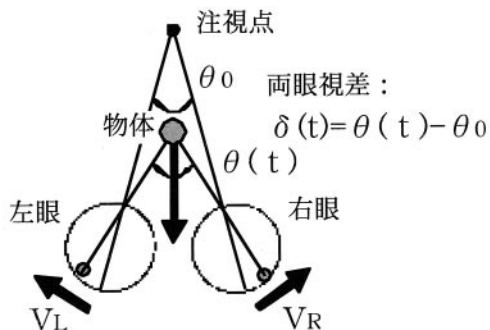
奥行運動の検出手掛りとして、両眼視差に基づく情報と両眼網膜像の速度差に基づくものがあり、視覚系はいずれの手掛りも利用していることが知られている。本研究の目的は、それぞれの手掛りの処理過程を比較検討することである。これは、3次元動画の効率的な表示を考える上で重要であるとともに奥行運動知覚メカニズムの理解とそのモデル化にも有益である。

## 方 法

### 奥行運動手掛り

2次元の網膜像から3次元の世界を知覚するためには、奥行次元を補う必要がある。そのために視覚系は様々な手掛りを用いていることが知られている。それらは、静止対象に対する奥行手掛りとしてであるが、奥行方向を含む3次元の運動の手掛りとしても考えられる<sup>1,2</sup>。しかし、実際に視覚系がそれぞれの手掛りをもとに奥行の運動を検出しているかどうかは別問題である。詳細な検討がなされているのは、限られた手掛りのみに

ついてである。3次元表示システムで問題となるのは、両眼視に関連する手掛りである。奥行運動の検出に係わる両眼性の手掛りには2つある。図1aにそれぞれの手掛りの説明を示す。ここで視差手掛りと呼ぶものは、両眼網膜像のずれ、つまり両眼視差（両眼網膜像差）に基づく奥行情報の時間変化である。奥行運動する対象に対する両眼視差は時間とともに変化するので、視差の時間微分を計算することができれば奥行運動速度を求めることができる（図1b）。もうひとつの速度差手掛りとは、左右眼網膜像の速度の差である。図1aの奥行運動する対象の網膜像を考えると、左右眼で異なる動きをする。図の例では運動方向が逆になっている。この左右眼それぞれの網膜像の速度を計算し、それらを比較することで、奥行運動速度が推定できることになる（図1b）。



a) 両眼視差の時間変化 :  $d\delta/dt$

b) 両眼網膜像間の速度差 :  $V_L - V_R$

図1 2つの奥行運動手掛り

通常我々が観察する網膜像には、この2つの手掛りが混在している。本研究の目的はそれぞれの手掛りの処理過程を比較することであるため、両者を分離する必要がある。そのために、左右眼に非相関の、したがって両眼視差による立体が不可

能な刺激を用いることで速度差手掛りを分離し、左右眼の視差は含むが時間的に相関のない刺激を用いることで視差手掛りを分離した<sup>5,6</sup>。刺激はランダムドットパターンあるいは格子縞パターンを用いた。ランダムドットパターンの場合は異なる乱数列を用いることで、相関のないパターンを作ることができる。縞刺激の場合は、傾きの異なるものを左右眼に呈示することで視差検出過程の影響を排除し、縞の位置を時間とともにランダムに変化することで速度検出過程の影響を排除した。また、両眼間にも時間的にも相関がある刺激を用いて、視差と速度差の両方を含む刺激条件とした。

### 実験1：時空間周波数特性

奥行運動の速度変化を空間的、時間的に変調することで、異なる時空間周波数を持つ刺激を作ることができる。実験1では、周波数を変化しそれに対する感度を測定することによって、周波数特性を測定した。ここでは、ランダムドットパターンを用いて、視差条件、速度差条件、両者を含む視差速度差条件の3条件でコントラスト感度の測定をした。刺激の運動は、垂直軸周りの奥行回転であり、面は正面を向いたままで軸の周りを回転し、被験者はその方向（上からみて時計回りか反時計回りか）を判断する（図2）。背景に対するドットのコントラストを変化し、75%の正答率を与えるコントラストを求めその逆数をコントラスト感度として得る。

回転の周波数は、時間周波数で表し、0.35Hz-8.4Hzの間で変化した。空間周波数を変えるためには、刺激の垂直軸に沿って速度が矩形波状に変化し、その周期を変えた（図2の下段）。0.24cpd, 0.48cpd, 0.95cpd, 1.9cpdの4種類の空間周波数を用いた。0.24cpdの場合は上下半分が逆位相で運動するものである（図2の上段中段）。時間周波数を変化した実験での空間周波数は0.24cpdの上下半分の相対運動条件、空間周波数を変化した実験での時間周波数は1.4Hzとした。

視差条件には左右方向の運動が含まれないために、回転刺激は前後の振動運動となる。視差条件

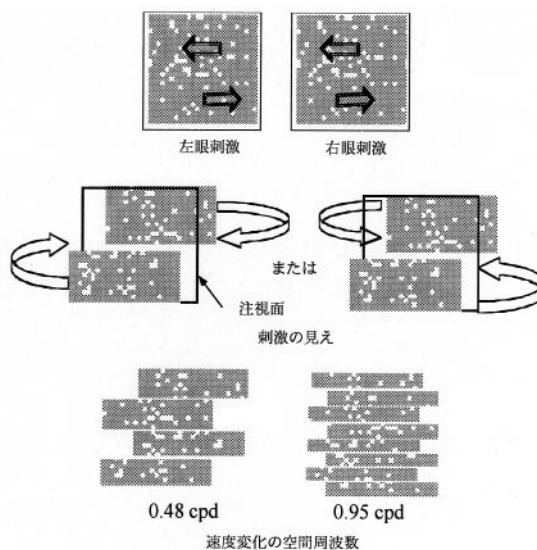


図2 回転運動刺激。(上) 左右画像、(中) 回転運動の見え方、(下) 空間周波数の変化。

では、速度差条件と視差速度差条件と同じ実験はできない。視差条件に関しては、2間隔の2者強制選択法を用いて、奥行運動の検出閾値の測定を行った。ここでは2回の刺激呈示があり、一方には奥行運動刺激が含まれ、他方には一定の奥行範囲（奥行運動刺激で変化する範囲）にドットが分布する刺激が呈示された。いずれも時間的に無相関なダイナミックランダムドットパターンが用いられ、単眼で観察するとちらつきのみが見える。被験者は2回の刺激呈示のいずれに奥行運動が呈示されたかを応答した。

### 実験2：個人差

一般に立体視機能の個人差は大きく、多くの人をステレオアノマリー（両眼立体視の障害者）として分類することもある<sup>7,9</sup>。奥行運動については視差条件の感度が高い者と速度差条件で感度が高い者とが見いだされ<sup>1</sup>、奥行運動検出にも比較的大きな個人差があることが予測される。それぞれの検出メカニズムの感度に個人差があるとすれば、ある人には視差手掛りが別の人には速度差手掛りがより有効になることも考えられる。この点は、少数の被験者に基づく精緻な実験を行う傾向の強い心理物理研究では大きな問題となる。限られた集団の結果から、いずれの手掛りが有効であるか

を判断することが難しいからである。本実験では25名の被験者を用いて、視差条件、速度差条件、視差速度差条件を含む刺激を用いて、奥行き運動の検出についての感度を比較した。比較のため、静止刺激の視差検出能力についても測定した。

実験1と同じ刺激を用いそれぞれの条件においてコントラスト感度を測定した。ただし、時間周波数は1.4Hz、空間周波数は0.24cpdで固定した。被験者は千葉大学の学部学生で学生実験の一部として実験に参加したものから、視力（含む矯正視力）が0.7未満のものを除いた、25名であり全員眼疾患の経歴は持たない。

### 実験3：色差の効果

色情報の運動知覚への効果は、輝度差に比較して小さいものであることが知られている。この点は、運動処理の過程と色情報処理の過程の独立性を示すものとして考えられ、初期視覚の2つの処理経路を考える上でも重要な問題である<sup>10-12</sup>。しかし、色情報が全く運動知覚に関与していないとはいえないことから色情報の運動への影響のあり方について様々な議論がなされている。一方、奥行き運動に関しても、色情報の関与が指摘されている<sup>13</sup>。ここで問題とするのは、それが速度差手掛りによるのか視差手掛りによるのかは不明である。もし、色情報が速度差手掛りによって奥行き運動知覚に影響するのであれば、運動知覚への色情報の寄与の新しい知見を示すことができる。

本実験では0.3 cpdの正弦波格子縞か中心周波数が0.3 cpdのガボールパッチを用いた。これはいくつかの理由で、ランダムドットのように高周波成分を含む刺激では等輝度刺激を作ることが難しいからである。例えば、眼球による色収差を考えると、その効果は高い周波数で特に顕著となり、刺激の赤成分に焦点を合わせた場合には、緑成分はぼけて低コントラストになる。そのため両者を逆位相で重ね合わせて輝度変化なしの色刺激を作ったとしても、実際には赤と緑のコントラストの差の分だけ輝度差が生じてしまう。したがって、等輝度刺激条件においても輝度成分が含まれる可能性を否定できない。しかし、この収差によるばけ

は0.3 cpd程度の低い空間周波数ではほとんど影響しない。一方格子縞を用いると、ランダムドットパターンのように相関の有無を決めることができない。本実験では、速度差条件において左右眼の格子縞の傾きを大きく変化し、視差手掛りの影響を排除した。垂直から左右30°（ガボールパッチの場合45°とした）逆方法に傾いた刺激を用いることで、静止状態での融合および奥行き判断が不可能である刺激を用いた。視差条件では、傾きは同一で視差を変化する格子縞を用い、視差変化に伴い格子縞の位相をランダムに変化した。この刺激によると単眼での観察からは左右いずれの方向の運動も観察されない。視差速度差条件には、傾いた格子縞を滑らかに運動するものを用いた。

実験1、2と同様に速度差条件と視差速度差条件では奥行き運動を用いた回転方向の弁別、視差条件では前後運動を用いた2間隔2者強制選択法による奥行き運動の検出実験を行った。

## 結 果

### 実験1：時空間周波数特性

図2に1名の被験者の実験結果を示す。図3aが空間周波数特性、図3bが時間周波数特性を示し、シンボルの違いが3つの運動条件を示す。図2から以下の点がわかる。(1) 低周波領域では、速度差の感度が、高周波領域では視差の感度が高い。(2) 視差条件では速度差条件に比較して、高い空間周波数における感度の低下が小さい。いずれも他の被験者の結果も同様である。4名の被験者のうち視差条件と速度差条件の相対感度が周波数によって逆転するは2名であるが、他の被験者も0.2cpdから1cpdの間での感度低下を比べると、速度差条件でより急激な低下がすべての被験者に見られる。それぞれの条件で奥行き運動を検出しているメカニズムが異なり、一方は他方よりも、より高い空間周波数の刺激に感度を持つといえる。視差速度差条件では、他の2条件に比べて感度が高いことから、2つのメカニズムが感度の決定に係わっていると考えることができる。

図3bにおいて、時間周波数特性を比較すると、

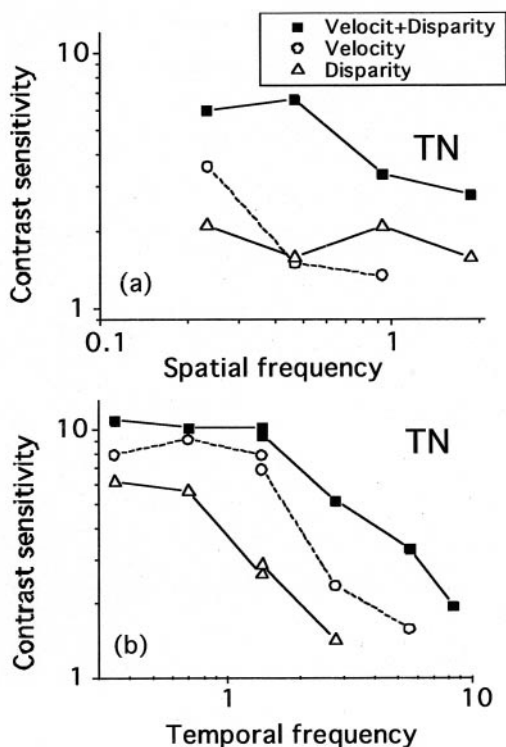


図3 奥行運動検出の空間周波数特性(a)と時間周波数特性(b)。1名の被験者の視差速度差条件(■), 速度差条件(○), 条件(△)を示す。

周波数の増加に伴う感度低下は、視差条件でより低周波で生じることがわかる。この被験者では、速度差条件では1.4Hzから2.8Hzの間で大きな感度の低下が生じているのに対して、視差条件では0.7Hzから1.4Hzの間で大きな感度低下が生じている。この傾向は他の被験者でも同様である。また、速度差条件と視差条件の相対感度の周波数に依存した逆転を示した被験者も1名いた。その被験者の感度は、低時間周波数では視差条件で、高時間周波数では速度差条件で高い。他の被験者はすべての周波数で速度差条件で感度が高かった。時間周波数特性からも、それぞれの条件で奥行運動を検出しているメカニズムが異なり、その時間周波数特性が異なることがわかる。また、視差速度差条件では、他の2条件に比べて感度が高いことも空間周波数特性の場合と同様である。この条件で2つのメカニズムが感度の決定に係わっている

との予測がここでも支持される。

本実験により、速度差手掛りを処理するメカニズムと視差手掛りを処理するメカニズムは異なり、前者は時間的には高周波、空間的には低周波に感度を、後者は逆に時間的に低周波、空間的に高周波に持つことが示された。両条件の間の相対感度も全体的にはこれを支持する結果であった。ただし、視差条件では実験方法が異なるため、感度を直接比較することは妥当ではない。この議論は、コントラスト閾値に測定方法が影響しないとの仮定の上で成り立つ。

#### 実験2：個人差

図4に各条件の間のコントラスト感度の間の相関を示す。横軸を視差速度差条件(図4a)あるいは静止視差条件(図4b)に対して、縦軸に速度差と視差条件を取ったものと、速度差条件と視差条件の閾値をとり両者の相関を示したものである(図4a)。まず図3aから、奥行運動の検出に関する個人差は、条件によらずコントラスト感度で10倍以上あることがわかる。また、多くの被験者でコントラスト1でも75%以上の正答率を得ることができていない。次に速度差あるいは視差条件と視差速度差条件との間の相関を比較すると、速度差条件に対してより高い(相関係数は速度差に対して0.86, 視差に対して0.21)との結果を得た。少なくとも本実験で設定した条件では、視差と速度差が含まれる条件の感度は速度差手掛りによって決定されていると考えられる。このことは、視差手掛りと速度差手掛りが独立な処理過程であるとの考えとも一致している。両者の独立性は、速度差、視差の両条件間の低い相関(0.29)からもみてとれる。一方、静止視差条件と視差手掛りによる奥行運動条件には強い相関が見られる(0.89)のに対して、静止視差条件と速度差条件の間の相関は低い(0.22)。これは、視差条件が静止視差の検出と同一のメカニズムが関与していることを支持する。なお、閾値の予測がコントラスト1を越えた場合に便宜上1としたが、この操作は結論には影響しない。閾値が1以下のデータのみを用いた場合も、相関係数の相対的な高低は

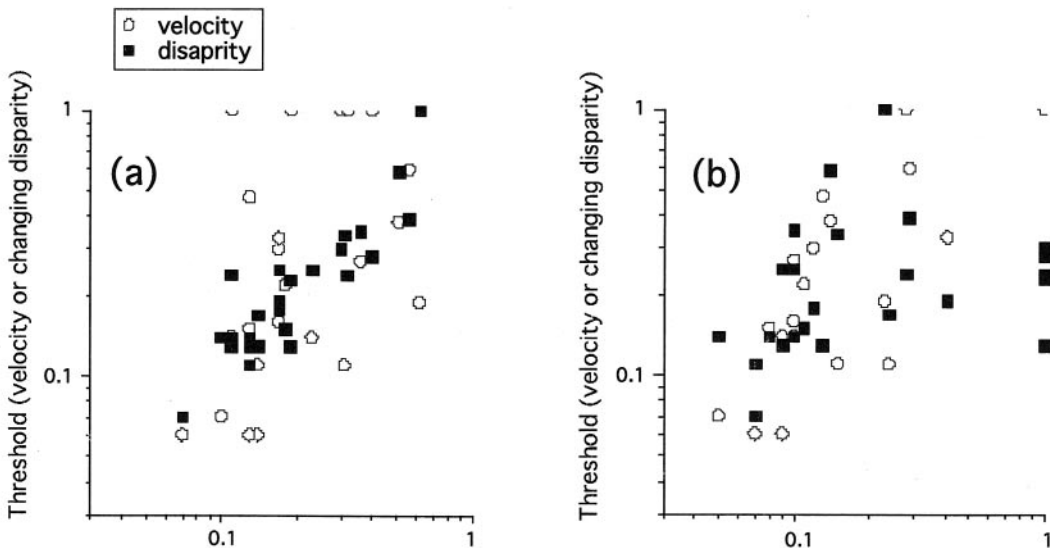


図4 コントラスト感度の条件間の相関。静止視差の検出と速度差条件 (□) と視差条件 (■) の感度の相関 (a) と視差速度条件と速度差条件 (□) 視差条件 (■) の感度の相関 (b)

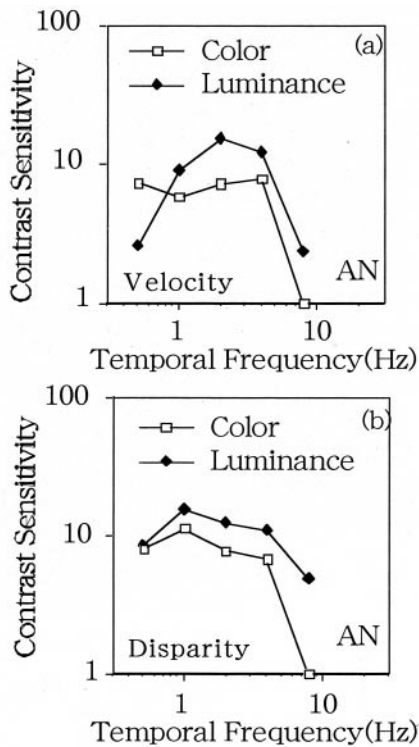


図5 輝度刺激と色刺激の時間周波数特性。速度差条件 (a) と視差条件 (b)

変わらない。

#### 実験3：色差の効果

図5に1名の被験者の実験結果を示す。まず、すべての条件で色刺激においても感度の測定が可能であり、色情報の奥行運動知覚への関与が示された。速度差条件、視差条件では、時間周波数特性が異なることから、色刺激の影響は色収差などの残存輝度情報の効果のみでは説明できない。色情報の処理過程の結果が奥行運動の知覚に係わっていることが予想される。また、速度差条件と視差条件を比較すると輝度刺激では前者が帯域通過型であるのに対して、後者は低域通過型を示している。これは実験1の結果と同様であり、速度差条件と視差条件での異なるメカニズムの介在を示す。一方色刺激の結果は、輝度刺激ほどの違いはない。色情報の処理過程は時空間的に低周波領域感度を持つことが知られているため、速度差条件でも視差条件でも類似した時間特性を示すことは予測されることである。

## まとめ

速度差, 視差, 視差速度差のそれぞれの条件で, 様々な条件で奥行知覚に対するコントラスト感度を測定した。実験結果から, 2つの奥行き運動の知覚に関わる処理過程が存在し, それらは時空間周波数特性に差があり相対的な感度差は個人によって変動する, また, 両手がかりとも色差刺激で形成しても有効であることが明らかにされた。これらの知見は, 3次元の動画の観察において時空間周波数に依存した奥行感の変化, 個人差による効果の大小, 色情報の圧縮などを考える上で重要であろう。

## 参考文献

- 1) S. Shioiri, A. Morinaga, and H. Yaguchi, "Depth perception of moving objects," in 3D television, video and display technology, F. Okano, ed. (Springer-Verlag, Berlin, 2002).
- 2) S. Shioiri, A. Nakajima, and H. Yaguchi, "Contribution of color to motion in depth," presented at the First Asian Conference on Vision, Hayama, Japan, 2001.
- 3) 原島 博 監修 and 元木紀雄, 矢野澄男 共編, 3次元画像と人間の科学 (オーム社, 東京, 2000), p.272.
- 4) I. P. Howard and B. J. Rogers, Binocular Vision And Stereopsis (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- 5) M. Maeda, M. Sato, T. Ohmura, Y. Miyazaki, A. H. Wang, and S. Awaya, "Binocular depth-from-motion in infantile and late-onset esotropia patients with poor stereopsis," Invest Ophthalmol Vis Sci 40(12), 3031-3036 (1999).
- 6) S. Shioiri, H. Saisho, and H. Yaguchi, "Motion in depth based on inter-ocular velocity differences," Vision Res 40(19), 2565-2572 (2000).
- 7) W. J. Tam and L. B. Stelmach, "Display duration and stereoscopic depth discrimination," Can J Exp Psychol 52(1), 56-61 (1998).
- 8) W. Richards, "Anomalous stereoscopic depth perception," J Opt Soc Am 61(3), 410-414 (1971).
- 9) W. Richards, "Stereopsis and stereoblindness," Exp Brain Res 10(4), 380-388 (1970).
- 10) P. Cavanagh and S. Anstis, "The contribution of color to motion in normal and color-deficient observers," Vision Res 31(12), 2109-2148 (1991).
- 11) P. Cavanagh, J. Boeglin, and O. E. Favreau, "Perception of motion in equiluminous kinematograms," Perception 14(2), 151-162 (1985).
- 12) M. Livingstone and D. Hubel, "Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception," Science 240(4853), 740-749 (1988).
- 13) C. W. Tyler and P. Cavanagh, "Purely chromatic perception of motion in depth: two eyes as sensitive as one," Percept Psychophys 49(1), 53-61 (1991).

## 研究発表

- 1) Contribution of color to motion in depth: First Asian Conference on Vision (2001年7月, 葉山町) p. 56
- 2) 2つの両眼性手がかりに基づく奥行き運動知覚の時空間周波数特性: Optics Japan 2001 (2001年11月, 東京)
- 3) 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: 日本視覚学会誌VISION13, pp.209-219, 2001
- 4) 奥行き運動知覚の個人差: 映像情報メディア学会誌投稿予定
- 5) Effect of spatiotemporal frequency on motion in depth: Vision Research投稿予定

連絡先 E-mail : shioiri@image.tp.chiba-u.ac.jp