■解説 (VISION Vol. 10, 1998)

視方向原理の例外現象について

下野孝一

東京商船大学

〒135-0044 東京都江東区越中島 2-1-6

1．視方向問題の位置付け

「人が対象の方向をどのように判断しているか」という問題は視覚系の機能を議論する上で重要な問題の一つである．一般的にいうと，視覚系の機能は空間定位機能（対象がどこにあるのかを“知る”機能）と，パタン認識機能（対象が何であるかを“知る”機能）に大別される．前者の機能はさらに，方向定位（対象が観察者を基準にして，あるいは他の対象を基準としてどの方向にあるかを知る機能）と距離定位（対象が観察者を基準にして，あるいは他の対象を基準にしてどの程度離れているかを知る機能）に分けることができる．というのは，経験的にはともかく，幾何学的には，対象の方向と対象までの距離がわかれば3次元空間内の対象の位置は記述できるからである．このように考えると3次元空間における方向定位の問題は，視覚機能研究の主要な問題の1つといえる．

主要な問題とはいえ，現在のところこの方向定位の問題は限定された条件下で扱われることが多い．限定された条件とは，対象も観察者も静止し，かつ眼球位置を一定にした条件である．一方，眼球が動いたり，観察者が運動したり，対象が運動したりする条件下での視方向の研究はあまり行われていない．しかし，人が運動したり，対象が運動したりすることは日常的に生じるので，方向定位の研究は，将来的には，観察者あるいは対象が運動している場合にまで拡大されるべきであろう（この点に関しては4節2項で論じる）．

限定された条件下での方向知覚についてではあるが，従来の研究[1-4]は，対象の視方向はウェールズーヘリングの視方向原理*（Wells-Hering's laws of visual direction，以下視方向の原理）できわめてうまく記述できることを示してきた．本稿の目的は，この視方向原理を簡単に説明するとともに，原理では説明できないいくつかの現象を紹介することである．これらの例外現象は，視方向は従来考えられていたほど単純な規則では説明できないことを示すとともに[6-12]，従来の“両眼性”の概念を修正する必要性を示唆している．本稿ではまた，例外現象を報告した研究から派生した問題など，今後の研究課題について簡単に議論する．

2．視方向原理

方向について考えるとき重要なことの一つは，方向の原点（基準点）を決めることである．理論上，方向の原点は空間のいずれにも仮定することができる．視方向の場合，網膜の中心窩，頭部，あるいは体幹部などが原点

---

*Wells と Hering は，それぞれ約200年，あるいは約100年前に，異なる用語ではあるが，視方向に関する原理を記述した．そのために彼等の名前が視方向の原理に冠されることが多い（たとえば，Ono & Mapp, 1995[4]; ただし，Wells の名前を冠することに関しては異論もある van de Grind, Erkelens & Laan, 1995[5]）．

に仮定されることがある[2]．しかし，一般的には視方向は，両眼の中心に原点をおく自己中心座標（egocentric direction）で記述されることが多い．自己中心座標で対象の視方向を記述するという考えは，歴史的には300年ほど前のアルハーゼンまで遡るが（Howard & Rogers, 1995[2], pp. 13-14），この考えにもとづいてさまざまな視方向に関する現象を説明できることが知られている[1-4, 13-20]．

この原理に関しては，いくつかのレビュー[1-4]がそれぞれの観点から，互いにいくらか異なる用語を用いて説明をおこなっている．本研究ではなるべくわかりやすく説明するという観点から，視方向の原理を，以下の4つの下位原理を使って説明する．（用語の意味は，図1に例示してある．）

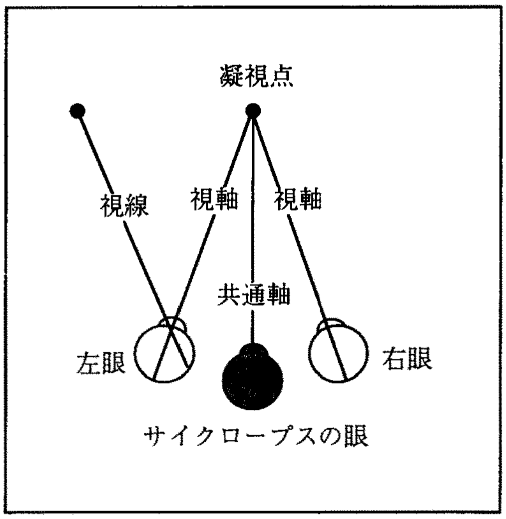

図1　視方向原理を理解する上で必要な基本的用語の説明．視方向原理では，両眼の中央に方向の原点を仮定している．この原点は，サイクロープスの眼 (cyclopean eye)，視方向中心 (center of visual direction)，エゴセンター (egocenter)，重複眼 (Doppelauge) などさまざまな呼ばれ方をする（ここではサイクロープスの眼という用語を用いる）．視方向の原理によれば，それぞれの眼における視軸と視線のなす角度がサイクロープスの眼に投影される．視線とは対象とその網膜像を結んだ直線であり，視軸とは視線のうち，凝視点とその網膜像を結んだ直線である．また，視方向の原理では，サイクロープスの眼と凝視点を結ぶ直線を共通軸と呼んでいる．

1．視方向の原点は両眼の中心にあるサイクロープスの眼である（サイクロープスの眼の原理）．

2．視軸上の対象は両眼視軸の交点とサイクロープスの眼を結ぶ線（共通軸）上に見える．(共通軸の原理)

3．視軸上にない対象は，共通軸から偏位して見える．

3－1．網膜像差が十分に大きい場合（つまり複視が生じる場合），あるいは単眼視の場合，対象の視線とそれぞれの眼の視軸のなす角が，サイクロープスの眼に投影される．［複視（あるいは単眼の）原理］．

3－2．網膜像差がゼロか，あるいは十分に小さい場合（つまり融合が生じる場合），

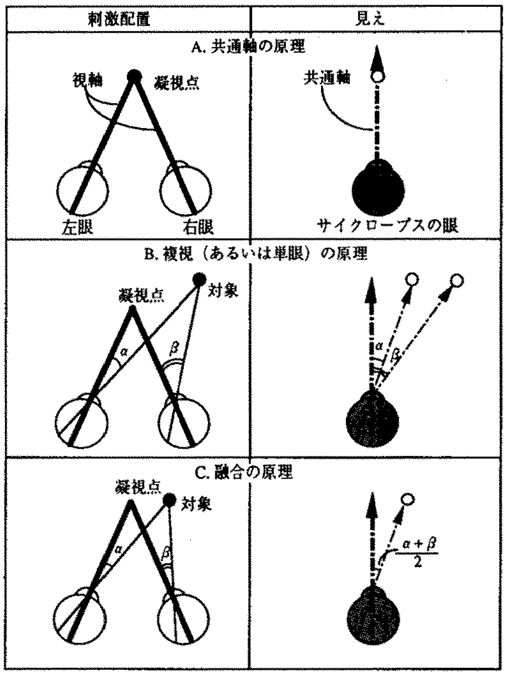

図2　視方向原理の3つの下位原理．図の右側のパネルは刺激配置を，左側のパネルは刺激の見えに関する視方向原理の予測を示している：共通軸の原理 (A)，複視（あるいは単眼）の原理 (B)，融合の原理 (C)（詳しくは本文参照）．

対象の視線とそれぞれの視軸のなす角が平均されてサイクロープスの眼に投影される（融合の原理）．

これらの原理は，図２で例示してある．図の右側のパネルが刺激配置で，左側のパネルが原理の予測する視方向である．図２Ａでは共通軸の原理が例示してある．両眼視軸がある点で交差しているとき（つまり，その点を凝視しているとき），視軸上の対象は凝視点と，サイクロープスの眼を結ぶ線上（つまり，共通軸上）に見える．図２Ｂでは複視（あるいは単眼の）原理が例示してある．対象が両眼視軸上にない場合，それぞれの眼の視軸と対象の視線は，ある角度をなして交わる．その角度はそのままサイクロープスの眼に投影される．図２Ｃでは融合の原理が例示してある．対象が両眼視軸上になく，かつそれぞれの眼の視軸と対象の視線のなす角度が十分に小さいか，あるいは等しい場合，その角度は加算平均されてサイクロープスの眼に投影される．

以上の原理について２つの簡単なデモンストレーションをしてみよう．最初のデモンストレーションは共通軸の原理と複視あるいは単眼の原理を例示するものであり（図３参照），２番目のデモンストレーションは融合の原理を例示するものである（図４参照）．

最初のデモンストレーションでは，画用紙などに描かれた２本の線分（ここでは赤と緑の線分を使ったと仮定する）が使われる．この線分は一方の端で交差しており，他方の端でだいたい６cmほど離れている（その距離は，両眼の水平距離に対応している）（図３Ａを参照）．これら線分の一方の端（線分が交差した端）を凝視したとき，１）その端から緑と赤の線分が自分に向かって重なるように見え，２）さらに緑の線分は右耳の方に向かって，赤の線分は左耳に向かってくるように見える（図３Ｂを参照）．（線分の見かけの位置は線分の物理的位置とは異なることに

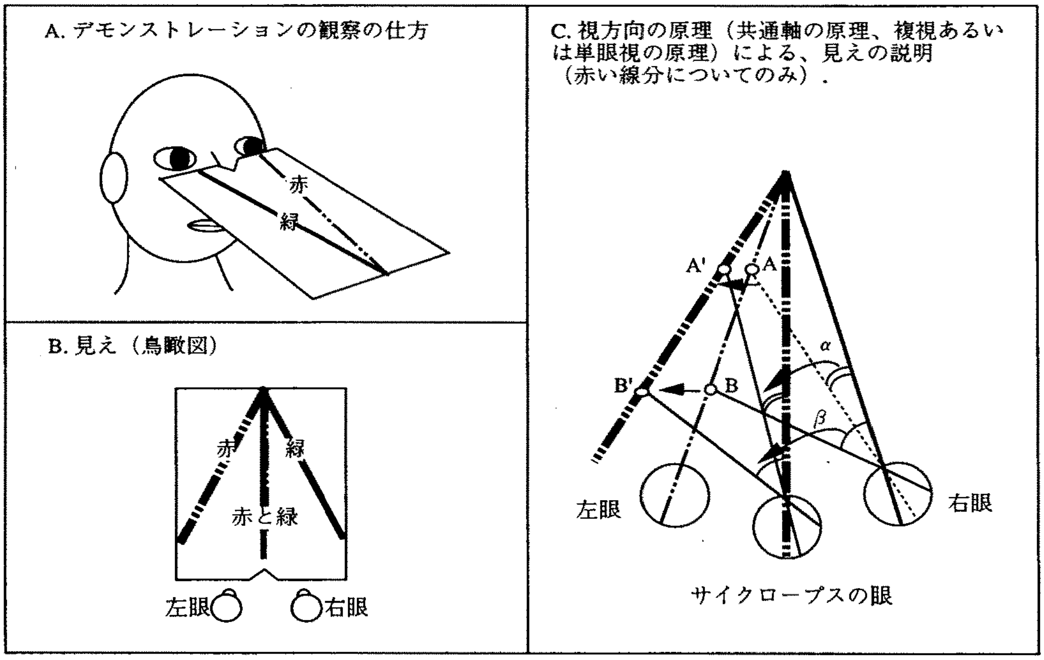

図３　共通軸の原理および、複視（あるいは単眼）の原理に関するデモンストレーション：線分の観察の仕方 (A)、線分の見え (B)、視方向の原理の説明 (C)（詳しくは本文参照）．このデモンストレーションはWells (1792) によって考案されたものである(Ono, 1981[19]; 中溝、1988[13]に引用）．

注意していただきたい．物理的には，緑の線分は右眼に赤の線分は左眼に向かってくるように描かれている．）最初の見えは，共通軸の原理のデモンストレーションである．赤の線分だけを考えて見ると，凝視は線分の先端に保たれているので，線分は左眼の視軸上にあると考えられる．したがって，赤の線分は共通軸に投影される．２番目の見えは，複視あるいは単眼の原理のデモンストレーションである．赤の線分だけを考えると，線分上のある点（たとえば，点A）の視線は，右眼の視軸にたいしてある角度（α）をなしている．この角度がサイクロープスの眼に投影されたとき，幾何学的には物理的な点の位置より耳側（点A'）に偏位する．線分上の全ての点で同様のことが生じるので（たとえば点Ｂ），赤の線分は耳側に偏位して知覚される．

２番目のデモンストレーションには網膜像差の値が小さいステレオグラムが使われる．図４では各半視野では曲線は互いに内側に向いている．このステレオグラムを融合すると，奥行きを持った刺激が知覚されるが，その視方向は，あたかも曲線の曲がった程度（それは図２Cのαおよびβに対応している）が打ち消し合ったかのように（つまり，加算平均されたかのように）見える．

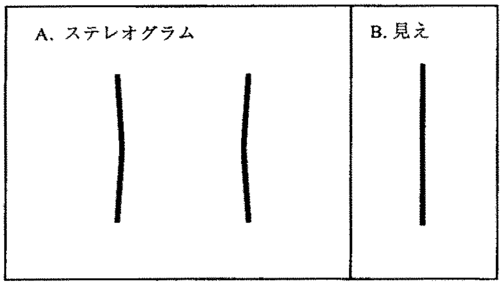

図４ 融合の原理に関するデモンストレーション．線ステレオグラム (A) を交差法（あるいは非交差法）で観察すると，網膜像差が小さいために刺激は融合し，中央はへこんで（あるいは飛び出して）見える．また，融合した対象の視方向は，あたかもそれぞれの単眼刺激の曲がった程度を打ち消しあうように垂直に見える (B).

３．視方向原理の例外現象について

視方向の原理は視方向に関する多くの実験結果を説明できる[13-20]．しかしながら，最近，両眼刺激（両眼で刺激が対応し，融合すると考えられる刺激）と単眼刺激（他方の眼に対応する刺激がなく，融合しないと考えられる刺激）が同時に存在するとき，条件によっては原理が成り立たないことが報告されている[6-11]．両眼刺激と単眼刺激が同時に存在するのは，日常観察条件に近いと考えられるので，日常空間での視方向の判断は従来の視空間の原理に従っていない可能性がある．その意味で例外現象について議論することは，より日常的な観察条件下での視知覚を理解することの第一歩となるだろう．本節では，例外現象のうち最近われわれが見い出した現象について述べていく．

われわれが見いだした例外現象は図５に例示してある．ランダムドットステレオグラムの各半視野の背景領域と中央領域のそれぞれに一組の単眼刺激を置き（図５A1），背景領域内の１組の単眼刺激を凝視する．すると物理的には一直線であるはずの中央領域内の単眼刺激は一直線には見えず，ずれて見える（図５B1）（実際のステレオグラムはOno & Mapp, 1995[4]の 図A1を参照）．この見かけ上のずれは，もし，単眼刺激が正確に凝視されているなら共通軸の原理に反していることになるし，もし凝視されていないなら，視軸と視線のなす角がそのままサイクロープスの眼に投影されていないので，単眼の原理に反することになる．（この現象において凝視の位置が正確に推定できない理由については，Shimono et al, 1997 [11]，を参照していただきたい．）

ランダムドットステレオグラム上の単眼刺激の視方向が視方向の原理に従わないことを

示す同様の例は，図５A2, B2にも示されている．単眼刺激が水平網膜像差を持っていても（図５A2），一直線に見えるのである（図５B２）．この水平網膜像差の大きさはステレオグラムの網膜像差とともに変化する．あたかも単眼刺激が周辺のランダムドットと同様，融合の原理に従ってその視方向を変えたかのようである．このことは，両眼刺激の周辺に単眼刺激を提示したとき，視覚系は単眼刺激をその周辺の両眼刺激のように取り扱うことを示唆している．この考えは，単眼刺激と両眼刺激の距離を離すにつれて，単眼刺激の視方向が単眼の原理の予測に近づくという事実[11]によっても支持されている．

方向定位に関して，単眼刺激が両眼刺激のように扱われうるとすれば，距離定位にも類似の事態が生じうるだろうか．このことをわれわれは，図６に示すようなランダムドットステレオグラムを使って調べた．ステレオグラムのそれぞれの半視野は上下２つのランダムドットパターンからなっており，上下に離れた２本の線分（単眼刺激）がそのパターン

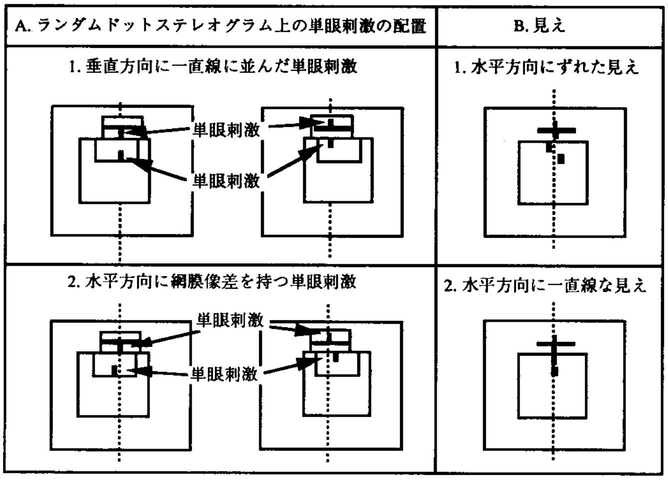

図５ 視方向の原理に反するデモンストレーションの模式図：物理的な刺激配置 (A)，見え (B)．A に示されるように，２組の単眼線分がランダムドットステレオグラムに（上の一組は背景領域に，下の一組は中央領域に），置かれている．A1では２組の単眼線分は物理的には互いに一直線であるが，A2では互いにずれている．しかし，B に示されるように，B1では２組みの単眼線分は互いにずれて見えるが，B2では一直線に見える．

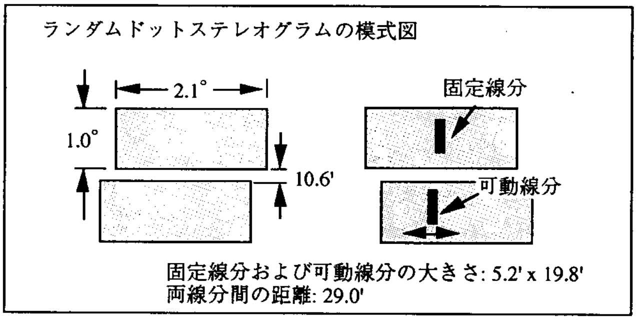

図６ 実験に使用したランダムドットステレオグラムの模式図．

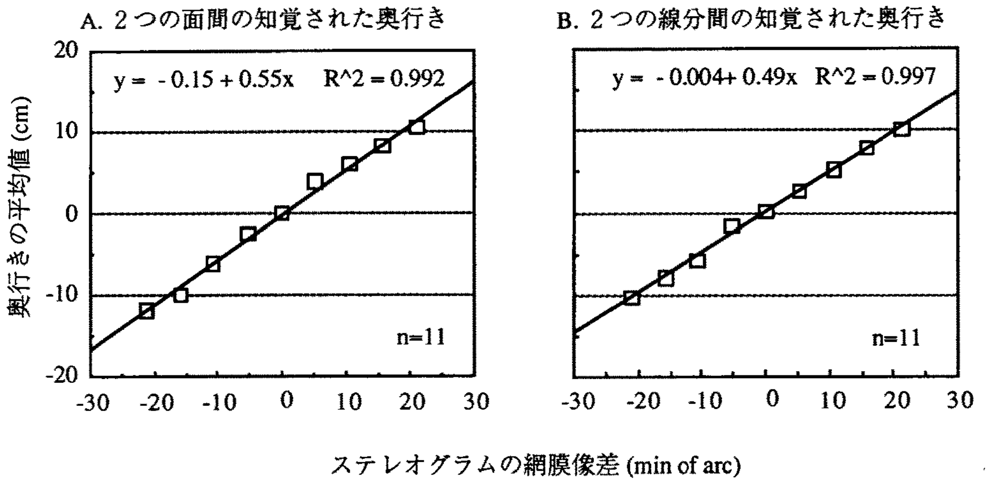

図7 ステレオグラムの網膜像差の関数としての奥行き（cm）：2つの面の間の知覚された奥行き(A)，2つの線分（固定線分と可動線分）間の知覚された奥行き(B).

上，同じ眼に提示されている．被験者は，2本の線分に関して方向に関する課題と距離に関する課題を行った．方向に関する課題は，上の固定刺激の視方向と下の可動刺激の視方向を一致させることであった．距離に関する課題は，2本の単眼刺激の相対距離（奥行き）を口答（cm か mm）で報告することであった．さらに被験者はステレオグラムの2つの面の相対距離も口答で報告した．もし，それぞれの単眼刺激が，両眼刺激の一部として扱われるなら，1）それぞれの単眼刺激はそれぞれの面に定位され，2）単眼刺激の視方向も融合の原理に従うかのように変化するはずである．図7，図8はそれぞれ，奥行きに関する結果と視方向に関する結果を示している．さらに，図7Aがステレオグラムの奥行きに関する結果を，図7Bが単眼刺激間の奥行きに関する結果を示している．図7から明らかなように，2本の単眼刺激間の奥行きは，ステレオグラムの奥行きとほとんど同じように（ステレオグラムの）網膜像差の関数として変化している．一方，視方向は，網膜像差が比較的大きい場合は，網膜像差に関係なく一定である（図8）．これらの事実は，単眼刺激の視方向と奥行きは，必ずしも一対一に対応しているわけではないことを示している．

本節ではランダムドットステレオグラムとともに提示した単眼刺激は視方向原理に従わないことを示したが，類似の事実は複数の研究者から報告されている．Erkelensとその共同研究者らは以前，3次元方向に運動する刺激をシミュレートしたランダムドットパターンは，暗室下では静止して見えるという現象を報告した[21]が，最近ランダムドットパターン付近の単眼刺激は周りの両眼刺激と同様に静

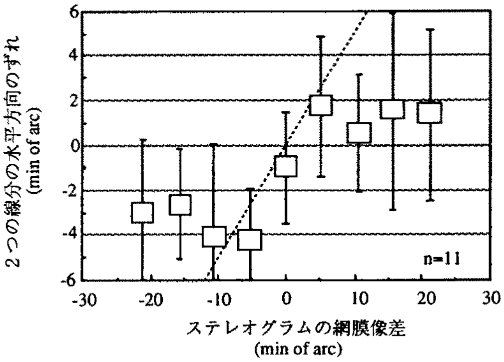

図8 網膜像差の関数としての，固定線分と可動線分間の水平方向のずれ (min of arc)．波線は，融合の原理が予測する両眼刺激の視方向の変化量を示している（変化量はそれぞれの両眼刺激の変化量を表わしており，網膜像差の1／2に対応している）．

止して見えることを報告した[9,10]．単眼刺激は網膜上を運動しているが，その運動は知覚されなかったのである．さらに，Enright (1988)[22]は両眼の視軸が移動しても単眼性残像の視方向は変化しないという現象を報告した．視方向の原理によれば，このような現象は（融合の原理に従う）両眼刺激にしか生じない．そのために，Enrightはこの現象を，単眼性の残像を長く観察したことによる両眼性の視覚皮質細胞の発火に帰した．

4．今後の課題

4.1 短期的課題

上述した例外現象から明らかになったことは，条件によっては単眼刺激はあたかも両眼刺激のように処理されることが示された．もしそうなら，興味深い問題が出てくる．方向や奥行き以外で，単眼刺激が両眼刺激のように処理されることを示す指標があるかという問題である．視力はそのような特性を示すかもしれない指標の一つである．従来，両眼刺激に対する視力は，単眼刺激に対する視力より高いとされてきた[23]．もし，単眼刺激が両眼刺激として振る舞うならば，ランダムドットステレオグラム内に単眼刺激を提示した場合，単独で提示した場合より視力は高くなるのだろうか．

もちろん，単眼刺激は，視覚機能のすべての面で“完全に”両眼刺激として処理されるわけではない．このことは，図7と図8を比較すればすぐに理解できる．単眼刺激の奥行き（図7）と方向（図8）は異なる反応特性を示している．単眼刺激と両眼刺激の奥行きは，少なくとも実験で使われた網膜像差の範囲内では類似の変化している（図7参照）が，図8が示すように，単眼刺激の視方向が両眼刺激の視方向と類似の変化をするのは非常に限られた範囲（視角で5分以下）である（図8参照．波線で示された直線が，融合の原理にもとづく“両眼刺激”の視方向変化量の理論値である．）しかし，Erkelens & van Ee (1997)[10]は単眼刺激と両眼刺激が運動している場合，単眼刺激は視角で約8度以上変化しても運動が知覚されないことを示した．われわれの実験結果とErkelens & van Eeの実験結果の差も興味ある問題である．

4.2 長期的課題

いままで述べてきたように，対象および観察者，また眼球位置が静止しているときの方向定位については，多くの研究がなされており，例外現象はあるが対象の視方向は視方向原理によって記述できることがわかっている．しかしながら，第1節で述べたように，対象が運動する場合，あるいは観察者が運動する場合の方向知覚の研究はあまりなされていない．ようやく最近，Swanston, Wade & Ono (1990)[24]が，観察者が運動し，対象が静止した場合の視方向を説明するモデルを提出した．このモデルの特徴の一つは，視方向原理のモデル[14]に，（観察者の運動に関する）自己受容器からの情報と（対象までの）距離情報を加味したことである．このモデルがどの程度妥当性があるか，今後の研究が待たれる．

謝辞

本論文を書くにあたっては，江草浩幸（国際医療福祉大学），中溝幸夫（福岡教育大学）の各氏から貴重なコメントをいただいた．記して感謝したい．

文献

1) H. Ono: Binocular visual directions of an object when seen as single or double. *O. Regan (Ed.): Vision and visual dysfunction, Vol., 9, Binocular single vision.* McMillan, London, 1-18, 1991.
2) I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular vision and stereopsis. Oxford Unversity Press, New York, 585-602, 1995.
3) 中溝幸夫：視方向（第10章第4節）．*日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック*．朝倉書店，印刷中，1998.
4) H. Ono and A. P. Mapp: A restatement and modification

of Wells-Hering's law of visual direction. *Perception*, 24, 237-252, 1995.

5) W. A. van de Grind, C. J. Erkelens and A. C. Laan: Binocular correspondence and visual direction, *Perception*, 24, 215-235, 1995.

6) 斎田真也，下野孝一，Hiroshi Ono：奥行き表面知覚時の Nonius は眼球位置の指標となり得るか. *光学連合シンポジウム旭川'93講演予稿集*，225-226，1993.

7) C. J. Erkelens and W. A. van de Grind: Binocular visual direction. *Vision Research*, 34, 2963-2969, 1994.

8) C. J. Erkelens, A. J. M. Muijs and R. van Ee: Binocular alignment in different depth planes, *Vision Research*, 36, 2141-2147, 1996.

9) C. J. Erkelens and R. van Ee: Capture of visual direction: an unexpected phenomenon in binocular vision. *Vision Research*, 37, 1193-1196, 1997.

10) C. J. Erkelens and R. van Ee: Capture of the visual direction of monocular objects by adjacent binocular objects. *Vision Research*, 37, 1735-1745, 1997.

11) K. Shimono, H. Ono, S. Saida and A. P. Mapp: Methodological cavieats for monitoring binocular eye position with Nonius stimuli. *Vision Research*, 1997 (in press).

12) H. Ono, K. Shimono and S. Saida: Transformation of the visual-line value in binocular vision: Stimuli on corresponding points can be seen in two different visual directions. in submission.

13) 中溝幸夫：両眼方向知覚とサイクロープスの眼. *福岡教育大学紀要*，37，135-145，1988.

14) 大野　倜：キクロプスの目を原点とした視方向. *心理学評論*，17，156-178，1974.

15) R. Barbeito and T. L. Simpson: The relationship between eye position and egocentric visual direction. *Perception and Psychophysics*, 50, 373-382, 1991.

16) H. Ono and G. Gonda: Apparent movement, eye movements, and phoria when two eyes alternate in viewing a stimulus. *Perception*, 7, 75-83, 1978.

17) H. Ono, W. J. Tam, and S. McConnell: Apparent displacement with a prism differs from optical displacement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 652-656, 1983.

18) 下野孝一，江草浩幸，大野　倜：両眼単一視：融合理論と抑制理論の限界. *心理学評論*，印刷中.

19) H. Ono: On Well's (1972) law of visual direction. *Perception and Psychophysics*, 30, 403-406, 1981.

20) S. Nakamizo, K. Shimono, M. Kondo and H. Ono: Visual directios of two stimuli in Panum's limiting case. *Perception*, 23, 1037-1048, 1994.

21) C. J. Erkelens and H. Collewijn: Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dots stereograms. *Vision Research*, 25, 583-588, 1985.

22) J. T. Enright: The cyclopean eye and its implications: vergence state and visual direction. *Vision Research*, 28, 925-930, 1988.

23) R. Cagenello, A. Ardid, and D. L. Halpern: Binocular enhancement of visual acuity, *Journal of the Optical Society of America A*, 10, 1841-1848, 1993.

24) M. Swanston, N. J. Wade and H. Ono: The binocular representation of uniform motion. *Perception*, 19, 29-34, 1990.