

# 視方向研究の最近の動向

草野 勉・下野 孝一

東京海洋大学

Current state and future directions of research on visual direction

Tsutomu KUSANO and Koichi SHIMONO

Tokyo University of Marine Science and Technology

We review studies on visual direction conducted over the last 30 years. We classify these studies into three categories: the concept of the visual egocenter, insufficiency of the law of monocular visual direction, and applicability of the laws to explain daily-life behaviors. The laws of visual direction are historically well accepted; however, there is controversy on whether the location of the visual egocenter is fixed or not. While the law of monocular visual direction predicts that monocular stimuli with the same local signs can be seen in the same visual direction, they can also be seen in different visual directions within or near binocularly fused stimuli. Although most experiments on visual direction have been carried out under artificial conditions, the laws of visual direction can be applied to explain behaviors such as pointing, reaching, and aiming. Our review suggests the necessity of “upgrading” of the laws of visual direction.

**Key words:** laws of visual direction, egocentric visual direction, relative visual direction, vernier task, pointing

キーワード: 視方向原理, 自己中心視方向, 相対視方向, 副尺課題, ポインティング

## 1. はじめに 視方向研究の意義

日常われわれは、目の前にある対象を何気なく手で掴んだり、あるいは人にぶつからないように行動したりしている。このような行動をおこなえるということは、われわれは対象の位置をきわめて正確に“知っている”ことを示唆している。人間が対象の位置を知っているということは、人間は自分を中心とした対象の方向、さらに自分から対象までの距離を知っていることに他ならない。

人間がどのような機序を通して対象の方向と距離を知覚しているのかについては多くの研究がおこなわれているが、いまだ明白とはいえない。しかしながら、条件によっては両者の知覚が正確 (veridical) である、すなわちそれらの知覚が物理

的な方向と距離によく一致することが知られている。距離に関していえば、距離に関する情報が豊富である場合は、対象までの知覚された距離は物理的距離とよく一致する (たとえば, Higashiyama & Shimono, 1994) し、方向に関していえば、対象の視方向 (見かけの方向) は、刺激の網膜像差が比較的小さい場合 (両眼融合が成立している場合) には、物理的位置とよく一致することが知られている (たとえば, Nakamizo et al., 1994)。これらの事実は、人間には、対象を3次元視空間で正確に知覚する空間定位機能 (距離定位と方向定位) が備わっていることを示唆している。

本論文の目的は、空間定位機能のうち特に、方向知覚に関する最近の知見を論評するとともに、それらを踏まえ今後の研究の方向について議論することである。距離知覚同様、方向知覚に関する研究は非常に古く、紀元前までさかのぼることが

でき、その長い研究の歴史の中で多くの知見が積み重なっている (Howard & Rogers, 2012; 中溝, 2003; Ono & Wade, 2012; Wade, 1998; Wade & Ono, 2012)。これらの研究から、視方向知覚が左右両眼のほぼ中央にある点を原点とした自己中心座標系で記述できること、および、その原点と自己中心座標系における対象の物理的位置からその対象の視方向が予測できることを示す証拠が数多く提出された。この原点は様々な呼ばれ方をしますが、以下の議論を簡潔にするために、本論文ではその原点を視方向原点 (visual egocenter) と呼ぶことにする。

本論文では方向定位に関する研究のうち、特に過去 30 年ほどの間に見出された知見をその研究内容から主要な 3 つのカテゴリーに分類し、議論をおこなう。最初のカテゴリーは、視方向原点の位置に関する論争に関連した研究である。この論争は、両眼視でも単眼視でも“視方向原点は両眼の中心にあり、その位置は固定している”という主張 (たとえば, Ono, Mapp, & Howard, 2002) と、“視方向原点は固定しておらず、刺激特性、あるいは観察条件によって移動する”という主張 (たとえば, Erkelens, 2000; Erkelens & van Ee, 2002; Mansfield & Legge, 1996) の間の論争である。多くの実験結果は前者の主張を支持しているが (Howard & Rogers, 2012; Ono & Wade, 2012)、現在でも実験結果を後者の主張にもとづいて解釈している論文も散見される (たとえば Khan & Crawford, 2001)。この論争について議論することで、研究者が視方向に関してどのような点を誤解しやすいかについて議論したい。

2 番目のカテゴリーは、従来の視方向原理による予測から逸脱する現象に関するものである。近年、両眼に提示される刺激 (以下、両眼刺激とする) の近傍に、単眼のみに提示される刺激 (以下、単眼刺激とする) が存在する場合に、単眼刺激の視方向が従来の視方向原理による予測から逸脱することを示す研究が数多く示されている (たとえば, Domini & Braunstein, 2001; Erkelens & van Ee, 1997a, 1997b; Hariharan-Vilupuru & Bedell, 2009; Shimono et al., 1998, 2005; Shimono, Tam, & Ono, 2007; Shimono & Wade, 2002)。これらの知見は、従来の視方向原理がいまだ不十分であることを示している。本論文ではこれらの現象を説明

する仮説について議論し、視方向原理の拡張の可能性について考察する。この議論の中ではまた、最近発見された両眼刺激の視方向に関連する知見についても言及する。

3 番目のカテゴリーは視方向原理をより日常的な観察条件や行動に適用しようというものである。従来の視方向の研究は、非常に人工的な条件で (たとえば暗室で頭部を固定し、単一光点を提示して) 視方向を測定しており、日常観察条件での視方向判断に関する研究は非常に少ない。このことは、視方向原理の生態学的な妥当性を疑わせることにもなっている (たとえば, Erkelens, 2000)。われわれが日常、対象の位置を指さしたり (pointing)、対象に手を伸ばしたり (reaching)、あるいは対象に照準を合わせたり (aiming) するなどの、さまざまな行動をとる視方向の判断をおこなうとき、その対象の視方向は従来の視方向原理でどの程度説明できるのだろうか。本論文では、視方向判断と行動との関係について、視方向研究の枠組みの中で議論し、今後の視方向研究の方向性を探りたい。

本論文は以下のような構成をとる。2. ではまず、視方向原理に関する基本的概念を説明する。続いて、3. では視方向原点の位置に関する論争について、4. では最近の視方向に関する知見をもとに視方向原理の妥当性について、5. では視方向研究を日常的な観察条件や行動に結びつける試みについて論じる。最後に 6. では、それまでの議論を踏まえ、視方向原理の修正・拡張をおこなう。

## 2. 視方向原理に関する基本的概念

対象の方向を記述するには原点、あるいは基準点が必要であるが、理論的には原点をどこにおいても対象の方向を記述することができる。視方向の場合、網膜の中心窩、頭部、あるいは体幹部などに原点を置いて記述することがある (たとえば, Howard, 1982; Howard & Rogers, 2012; Ono & Mapp, 1995)。しかし先述したように、一般には対象の視方向は頭部座標、なかでも両眼のほぼ中央に原点をおく自己中心座標で記述され、対象の視方向を予測する視方向原理も、この視方向原点にもとづいて記述される。本節では、視方向原理

に関連したいくつかの用語について解説するとともに、個別の原理について簡単に議論する。本節で議論する原理は、基本的には Mapp, Ono and Howard (2002), 中溝 (2003), Ono and Mapp (1995) で使われたものと同じであるが、用語法は下野 (1998) に従う。彼は視方向原理を4つの下位原理に分類し、それぞれサイクロプスの眼 (cyclopean eye) の原理、共通軸の原理、複視あるいは単眼の原理、および融合の原理と名づけている。

視方向を予測する際に、物理的配置を記述するための用語を図1に示す。対象とその網膜像を結び、眼球の結節点 (nodal point) を通る直線を、その対象の視線 (visual line) と呼ぶ (視線という訳語は一般に凝視方向を表す“gaze”に充てられることが多いが、本論文で“visual line”に対する訳語として用いる)。対象が両眼に提示される場合には、左右それぞれの眼においてその対象の視線が存在する。中心窩と結節点とを通る直線をその眼の視軸 (visual axis) と呼び、左右眼の視軸の交差する空間上の点を凝視点 (fixation point) と呼ぶ。また、左右眼の結節点を結んだ線分を視基線 (visual base) と呼ぶ。視方向原理は、対象の視

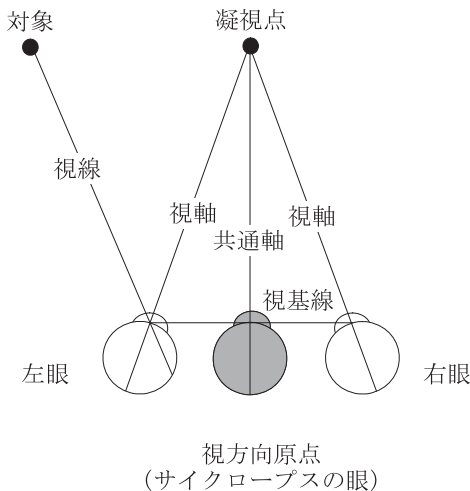


図1 視方向原理を理解する上で必要な基本的用語  
 視方向原理では両眼の中央に視方向の原点を仮定しており、その原点をサイクロプスの眼と呼ぶ。視線とは対象とその網膜像を結んだ直線、視軸とは凝視点とその網膜像を結んだ直線である。また、サイクロプスの眼と凝視点を結んだ線分は共通軸と呼ばれる。両眼球の結節点 (nodal point) を結んだ線分は視基線と呼ばれる。

線と視軸との位置関係、および、対象が単眼のみ  
 に提示されるか両眼に提示されるかによって、対  
 象の視方向を予測する。

サイクロプスの眼の原理とは、“対象の視方向は、両眼の midpoint を原点として判断される”とする原理である。このときの原点をサイクロプスの眼と呼ぶ。また、サイクロプスの眼と凝視点とを結んだ線分を共通軸と呼ぶ。以下、図2を用いて、共通軸の原理、複視あるいは単眼の原理、融合の原理の3つの原理を説明する。なお、図の左側の欄が刺激配置で、右側の欄が原理の予測する視方向である。

共通軸の原理は、“視軸上の対象は共通軸上に見える”とする原理である (図2A)。この原理によれば、図に示すように、両眼の視軸が1点で交差しているとき (その点が凝視点であるとき)、凝視点は共通軸上に見える。共通軸は、凝視点の物理的な位置とサイクロプスの眼とを結んだ線分であるので、凝視点の視方向は、サイクロプスの眼を原点とした凝視点の物理的な方向と一致する。

視軸上にない対象の視方向は、複視あるいは単眼の原理および融合の原理によって記述される。図2Bにあるように、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。このとき、左右眼における視軸と対象の視線とのなす角の大きさの差 (図2Bにおける  $|\alpha - \beta|$ ) が網膜像差と一致する。網膜像差が大きいつきには、物理的には1つの対象が二重に見えるこの現象を複視 (double vision または diplopia) と呼ぶ。複視が生起している場合の、二重に見える像のそれぞれの視方向は、左右それぞれの眼における視軸とその対象の視線とのなす角の大きさだけ、共通軸から偏位したものとなる。図2Bの例では、二重に見える対象の共通軸に対する2つの視方向は、それぞれ  $\alpha$  および  $\beta$  となる。また、単眼刺激の視方向に関しても同様に、視軸と対象の視線とのなす角が、共通軸からの視方向の偏位となる。図2Bの例では、左眼のみ (あるいは右眼のみ) に提示された対象の共通軸に対する視方向は、視軸と対象の視線とのなす角の大きさ  $\alpha$  (あるいは  $\beta$ ) となる。このように、複視において二重に見える像の視方向、および単眼刺激の視方向は、視軸と視線とのなす角の大きさだけ共

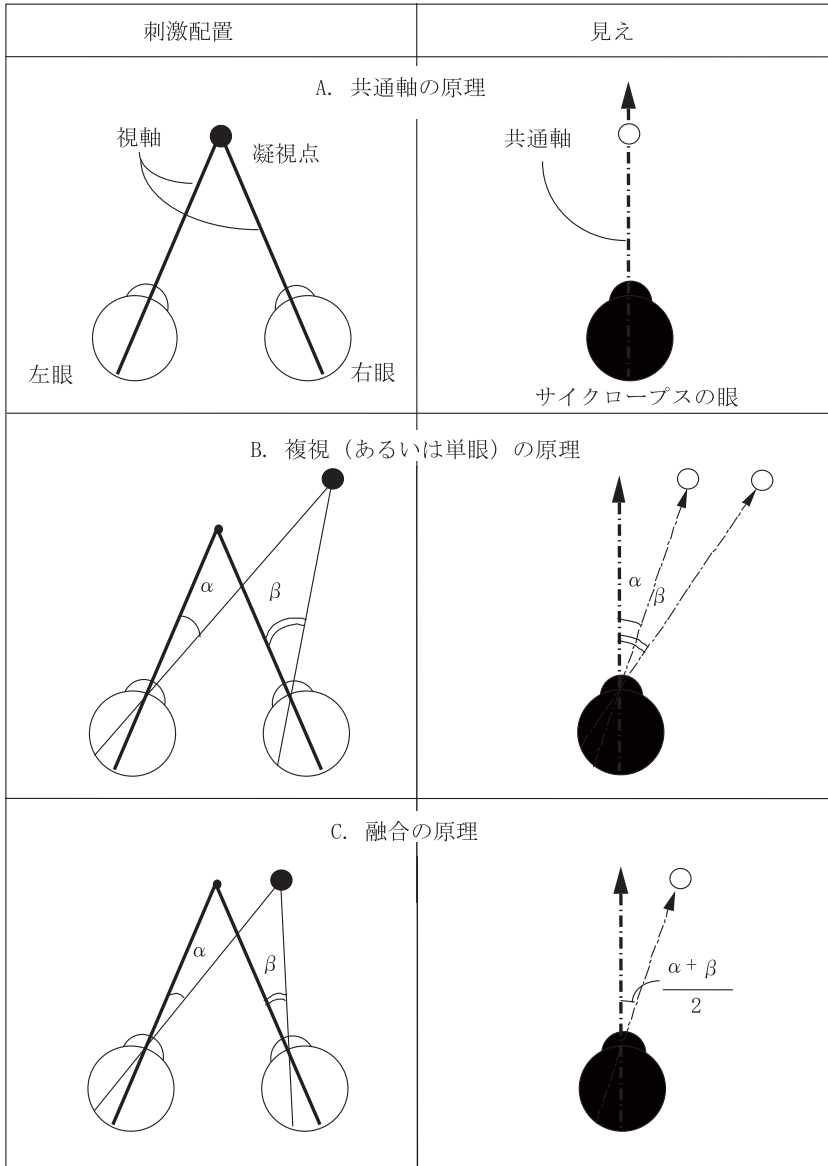


図2 共通軸の原理 (A)、複視 (あるいは単眼) の原理 (B)、および融合の原理 (C) による視方向の予測。左の欄は刺激配置、右はサイクロプスの眼からの刺激の予測される視方向をあらわす。

通軸から偏位したものとなる。この原理を複視あるいは単眼の原理と呼ぶ。本論文では、この原理の呼称として、複視を生起させる刺激に関する記述では“複視の原理”を、単眼刺激に関する記述では“単眼の原理”を用いる。

一方、融合の原理は、対象の網膜像差 (図 2C における  $|\alpha - \beta|$ ) が十分に小さいか、あるいはゼロである場合の対象の視方向を予測する。網膜像差が小さい場合、左右眼の網膜像は統合され、単

一視が成立する (両眼融合)。両眼融合が成立している対象の視方向は、左右眼における視軸と対象の視線のなす角の大きさの平均 (図 2C における  $(\alpha + \beta) / 2$ ) の大きさだけ共通軸から偏位したものとなる。この原理を融合の原理と呼ぶ。なお、その両眼刺激が左右眼に形成する網膜像のうち一方を単眼刺激として観察した場合の視方向は、単眼の原理からそれぞれ  $\alpha$  または  $\beta$  となる。このように網膜像差を持った刺激の左右眼における網

膜像が融合すると、その刺激の視方向は、それぞれの眼に提示されている刺激を単眼で観察したときの視方向とは異なったものとなる。この現象をアレトロピア (allelotropia) とよぶ。

### 3. 視方向原点の位置を巡る論争

視方向原理によれば、対象の視方向は、視方向原点の位置、対象の網膜像位置、さらに両眼の位置から、比較的簡単に導かれる。にもかかわらず、視方向原理に関する議論は時折混乱し、誤解にもとづく議論がなされることがある。以下の節での議論の混乱を避けるためにも、本節では従来、どのような誤解が生じやすかったかについて明白にしておきたい。

視方向に関して誤解の生じやすい点の1つは、視方向原点の位置に関するものである。10年ほど前にも、視方向原点の位置をめぐる、研究者間で論争がおこなわれている。論争の1つの原因は相対視方向と自己中心視方向（あるいは絶対視方向）の概念が明白に区別できていなかったためである。相対視方向とは対象間の方向差のことであり、いずれか一方の対象を基準にもう一方の方向が決定される。自己中心視方向とは観察者からの対象の方向である。たとえば図3Aには、対象A、B、Cのそれぞれの自己中心視方向が観察者

とそれぞれの対象を結ぶ線分で表現されている。その交点が自己中心視方向判断の基準（視方向原点）ということになる。一方、観察者にとってのAの相対視方向はB、あるいはC、また空間内のどの点を基準にしても考えることができる。

以下の議論で明らかにするが、視方向原点の位置は2つ以上の対象の自己中心視方向を測定することでしか推定できない。原点位置の推定によく使われる方法はHowardとTempletonの方法 (Howard & Templeton, 1966) である。かつてBarbeito and Ono (1979) は4種類の視方向の原点を測定する方法の予測妥当性と信頼性を調べ、HowardとTempletonの方法が最も高い予測妥当性と信頼性を持つことを見出した。この方法では両眼で対象（標準刺激と比較刺激）を継時的に観察する。典型的には刺激は暗室で提示される光点であり、観察者にはまず標準刺激（たとえば図3BのS1）のみが数秒提示され、“自分からの方向”を判断するように教示される。その後標準刺激が消えると同時に、標準刺激よりも観察者に近い距離に比較刺激が数秒間提示され、観察者は標準刺激と比較刺激の“自分からの方向”が一致するように、比較刺激の位置を前額面に沿って調整するように教示される。調整が終わった後、標準刺激と比較刺激の間には直線が引かれる。次に別の標準刺激（たとえば図3B中のS2）に対して

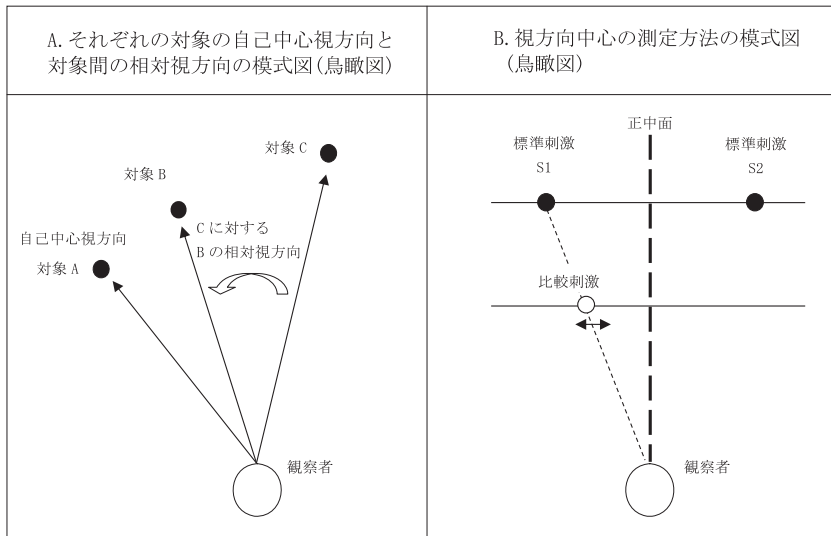


図3 対象の自己中心視方向と相対視方向の模式図 (A) と視方向原点の測定法 (HowardとTempletonの方法) の模式図 (B)  
視方向原点は自己中心視方向を求めることによるのみ推定可能である。

も同様の手続きで直線を引く。この方法では継続的にしろ、それぞれの刺激の自己中心方向が測定されており、それらの方向が同じ原点から判断されたと仮定すると、直線の交点が視方向原点となる。このような課題で測定した原点位置は、個人差はあるが両眼の中央にくることが多く、サイクロプスの眼の原理と一致する（たとえば Ono & Barbeito, 1982, 図 3 を参照）。この方法はいくつかの修正が加えられ、筋運動方向原点 (Shimono & Higashiyama, 2011; Shimono, Higashiyama, & Tam, 2001) や、聴覚方向原点 (Sukemiya, Nakamizo, & Ono, 2008) の測定においても使われている。

一方、対象の相対視方向のデータのみから視方向原点の位置の変化を推定することは不可能である。この点を議論するために、相対視方向判断でよく使われる副尺課題について考えてみよう。副尺課題では、たとえば、上下に並んだ 2 本の垂直線分の水平方向が同じに見えるよう、つまり一直線に見えるように線分の水平位置を調整する。このとき観察者は相対視方向が“ゼロ”になるように課題を遂行している。このような副尺課題を用いた研究の例として、Mansfield and Legge (1996) を挙げることができる。彼らを用いたステレオグラムの例を図 4A に示す。図 4A の下の刺激は左右眼で同じ輝度コントラストを持つガボールパッチ（輝度の正弦波状の変化（搬送波）にガウス関数状の包絡線をかけた刺激）の対、上

の刺激は左右で輝度コントラストが異なるガボールパッチの対である。上下の刺激は網膜像差を持ち、融合すると上の刺激が下に対してより奥に見え、かつ上の刺激の視方向が下に対してより左側になる（この視方向の知覚は融合の原理と矛盾するが、その解釈については 4.2 において議論する）。彼らは、上の刺激（コントラスト混合刺激）を標準刺激、下の刺激（等コントラスト刺激）を比較刺激とし、両者が一直線に見えるように、後者の水平位置を調節させた。彼らはまた、標準刺激の網膜像差を変化させ、一直線に見えるときの比較刺激の水平位置を測定した。図 4B がその模式図である。彼らは、比較刺激の水平方向の位置を 3 次元空間上にプロットした。図中●は比較刺激の得られた位置を示している。図に示されたように、標準刺激の位置と比較刺激の位置差は網膜像差が大きくなるにつれて増大した。彼らはこの一群のデータに対して線分を当てはめ、視基線（図 1 を参照）との交点を視方向原点（彼らの用語では binoculus）とした。その結果、刺激間の位置差は標準刺激のコントラスト比に依存したので、“原点の位置”（図中○で示されている）は、左右眼に与えられる刺激のコントラスト比に依存して移動すると主張した（可動原点仮説）。

彼らの主張は、その後 Banks, van Ee, and Backus (1997) や Mapp and Ono (1999) によって批判を受けている。その問題点は、彼らの結果は少なくとも 2 通りの解釈が可能であり、一義的

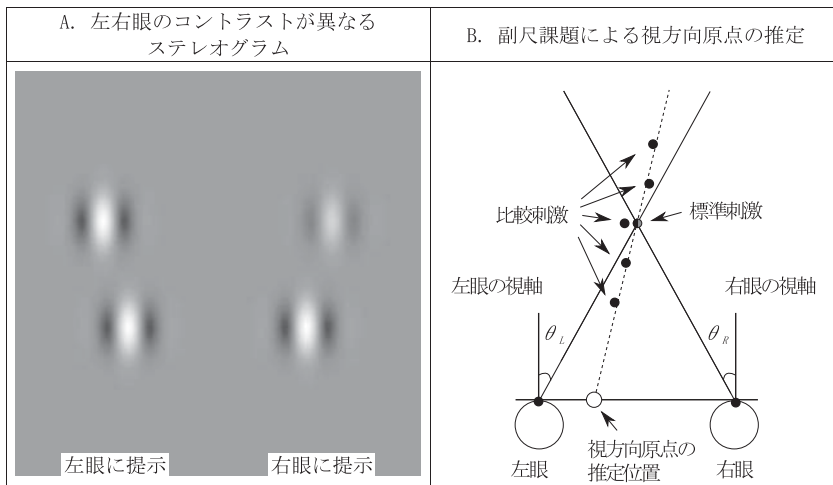


図 4 Mansfield and Legge (1996) によって使われた刺激の例 (A) と彼らが“視方向原点”の推定に使った考えの模式図 (B)

な解釈ができないということである。1つの解釈は、視方向原点は固定していたが、標準刺激と比較刺激のうちいずれか一方の対象の位置（あるいは両者の位置）が移動したと仮定するものであり、他方の解釈は、対象の位置は固定していたが、視方向原点が移動したと仮定するものである。Mansfield and Legge (1996) は対象の自己中心視方向を測定していないために、前者の解釈の可能性を排除できない。Erkelens (2000) および Erkelens and van Ee (2002) もまた、副尺課題を使ったデータから可動原点仮説を主張しているが、同様の批判に晒されている (Howard & Rogers, 2012; Khokhotva, Ono, & Mapp, 2005; Ono et al. 2002; Ono, Mapp, & Mizushina, 2007)。

視方向原点の位置に関する類似の誤解は、視方向の原点は“優位眼 (dominant eye)”であるという考えである。この誤解はおそらく、刺激が一方の眼に提示されているときでも、視方向原点は提示された眼ではなくサイクロプスの眼にあるという主張が直観的でないことに起因すると思われる。単眼視方向は、一般的にはサイクロプスの眼の原理と一致することはよく知られている (たとえば Nakamizo, Kawabata, & Ono, 2008; Nakamizo et al., 1994; Ono & Barbeito, 1982, cf., Erkelens, 2000)。

しかしながら時折、視方向の原点は“優位眼 (dominant eye)”であるという考えにもとづいた議論も散見される (たとえば, Khan & Crawford, 2001)。(優位眼に関する最近の論評は Mapp, Ono, & Barbeito, 2003 を参照)。優位眼が視方向原点であるとする考えの問題点を、優位眼の検査法のひとつであるリングテストを例に解説する。リングテストでは、被検者は凝視刺激と同じ位置に置かれたリング (そのリングの中央に凝視刺激が見えている) を手でつかみ、凝視刺激がリングの中央に位置するような状態を保ったまま、スムーズな動きで手に持ったリングをいずれか一方の眼前に持ってくるように教示される。このとき、リングが運ばれた方の眼を、その被検者の優位眼とする。つまり、リングテストでは、凝視刺激とリングとの自己中心視方向の差 (相対視方向) をゼロに保ったまま、リングを両眼融合の成立しないほど網膜像差が大きくなる距離まで運ぶ課題がおこなわれる。

優位眼を視方向原点とする考えは、凝視刺激とリングの物理的位置とを通る直線上に優位眼が位置するためであると考えられる。しかし、副尺課題と同様に、相対視方向の測定から、自己中心視方向の原点を予測することは不可能である。なぜなら、優位眼が視方向原点となって優位眼の視軸上にリングが知覚される場合と、視方向原点が両眼の中心 (サイクロプスの眼) にあってリングの視方向がサイクロプスの眼と凝視刺激とを結ぶ線に一致する場合とを区別できないからである。なお、両眼融像が成立しない刺激の視方向を予測する複視の原理からは、後者の知覚が予想され、多くの研究でその予測は確認されている (Mapp & Ono, 1999)。優位眼を視方向原点とする誤解の源は、対象の視方向ではなく物理的位置をもとに視方向原点を推定しようとする点にあるといえる。

#### 4. 視方向原理に関する最近の知見： 単眼視方向と両眼視方向

本節では、最近の視方向に関する知見を視方向原理の妥当性を検討する形式で議論する。従来の視方向に関する研究の枠組み (たとえば, Mapp et al., 2002; 中溝, 2003; Ono & Mapp, 1995; 下野, 1998 など) では、対象の視方向を自己中心視方向と相対視方向とに分類する。また、2. で述べたとおり、視方向原理は、刺激のカテゴリーとして単眼刺激と両眼刺激とを設定し、両眼刺激についてはさらに、両眼融合が成立する場合と複視が生起する場合とに分類し、それぞれのカテゴリーについて視方向を予測する原理を設定している。

さらに、近年の視方向研究の知見から、これらの刺激のカテゴリーに加えて両眼刺激とともに提示された場合の単眼刺激を新たなカテゴリーとして加えることの必要性が高まっている。両眼刺激と単眼刺激とが混在する条件としては、遮蔽事態が挙げられる (Gibson, 1979)。自己からの様々な距離に複数の面が存在し、自己から同方向にあるより近い面はより遠くの面を遮蔽する。このとき遮蔽する面は両眼刺激であり、遮蔽される面 (の一部) は単眼刺激である。このような場合、従来の視方向原理では説明できない現象が報告されている (たとえば, Ono, et al., 2003; van

Ee, Banks, & Backus, 1999)。さらに、両眼刺激の中に単眼刺激が埋め込まれた場合や、両者の距離が近い場合に、従来の視方向原理では説明できない現象も数多く報告されている (Domini & Braunstein, 2001; Erkelens & van Ee, 1997a, 1997b; Shimono et al, 1998, 2005, 2007; Shimono & Wade, 2002)。われわれが日常経験する視空間は両眼刺激と単眼刺激が入り混じっている点から考えても、両者が混在する場合の単眼刺激の空間定位について議論することは、視空間の一般的な特性を考える上で重要である。

このことを踏まえ、本節では、単眼刺激のみが提示される条件、両眼刺激が提示される条件、単眼刺激と両眼刺激が同時に提示される条件、および複視が生起する条件ごとに、視方向研究の最近の知見をまとめ、視方向原理の妥当性および修正の必要性を議論する。

#### 4.1 単眼視方向 (単眼刺激のみが提示された場合) : 単眼の原理

##### 4.1.1 自己中心視方向

単眼の原理によれば、単眼刺激の自己中心視方向は、凝視点の位置 (両眼輻輳位置、あるいは両眼眼球位置)、および刺激の網膜位置 (刺激の視線と視軸とのなす角) に依存する。したがって、単眼の原理の妥当性を検討するためには、眼球位置の統制のための凝視点を両眼に提示する必要がある。しかし、両眼刺激の近傍に提示された単眼刺激の視方向は、両眼刺激によって影響を受けることが知られている (Domini & Braunstein, 2001; Erkelens & van Ee, 1997a, 1997b; Shimono et al, 1998, 2005, 2007; Shimono & Wade, 2002)。したがって、実験によって測定された単眼刺激の自己中心視方向は、両眼刺激である凝視点の影響を受けたものである可能性があるが、上述のとおり視方向の測定は凝視刺激をとまなうので、その影響の程度は明白ではない。そのような限界はあるものの、従来の研究によれば、凝視刺激がある場合の単眼刺激の視方向は、視方向原理による予測と一致している (Mapp et al. 1989)。ただし、両眼刺激と単眼刺激が同時に、比較的近傍に提示されたときには、単眼刺激の視方向は単眼の原理と矛盾する場合がある。この点に関しては、4.3.1で議論する。

単眼刺激に対する自己中心視方向判断は、Mapp, Ono, and Khokhotva (2007) の実験が参考になる。彼らは、単眼刺激に向かってダーツを投げるとい課題と、単眼刺激にライフルを向けるという課題でそれぞれダーツの位置の確度 (accuracy: 刺激の物理的位置と投げられたダーツのずれ、あるいは刺激の物理的方向とライフルの方向のずれ) を測定した。さらに各観察者の斜位 (phoria: 両眼で対象を見ているときに一方の眼を隠すと隠された眼の視軸が外れる現象) の量を測定した。その結果、斜位の量と確度には高い相関があった。このことは単眼での自己中心視方向の判断には両眼の眼球位置が影響していることを示唆しており、視方向原理の考え (単眼の原理) と一致する。

また、凝視点と刺激の網膜位置に加え、単眼刺激の見かけの距離も単眼刺激の自己中心視方向に影響する (Gogel & Tietz, 1974)。Gogel and Tietz (1974) は、観察者が単眼で静止した対象を観察したとき、止まっているはずの単眼刺激が頭部運動と同期して側方に動いて見えることを報告した。彼らによれば、この見かけの運動は、単眼刺激までの見かけの距離が視覚系に正しく“登録 (register)”されなかったためである。Gogel の言う“正しく登録されない”というのは、視覚系が何らかの原因で対象の距離を過小推定、あるいは過大推定している状態のことである。たとえば、静止した単眼刺激が実際の位置より手前に登録された (刺激までの距離が過小推定された) 場合、頭部位置を左から右へ動かしても、単眼刺激の物理的位置は静止しているので常に同じ方向に見える。その結果、単眼刺激は頭部位置に同期して動いて見える。距離が過大推定された場合には、単眼刺激は頭部運動とは反対方向に動いて見える。Gogel (1990) は、視覚系は対象の物理的位置、見かけの位置、そして頭部位置が作り出す現象的幾何学を内的に“知っている”ので、単眼刺激の視方向はその見かけの距離に依存すると仮定した。この説明は、Shimono et al. (2002) による立体錯視運動の説明、また Shimono et al. (2007) による両眼表面—デフォルト仮説の説明に対しても適用された。

##### 4.1.2 相対視方向

単眼の原理によれば、単眼刺激の共通軸に対す



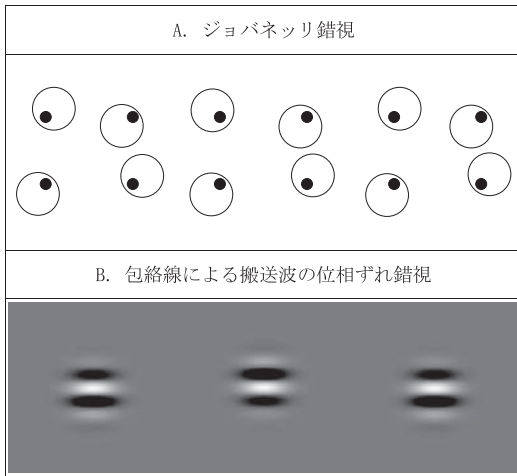


図5 刺激布置と見かけの位置（単眼視方向）が異なる刺激の例  
 ジョバネッリ錯視（A）と包絡線の中心位置の変化による搬送波の見えの位相の変化（B）。

る視方向は、刺激の視線と視軸とのなす角と等しくなる。視線と視軸とのなす角は、中心窩に対するその刺激の網膜像の位置に対応する。したがって、同じ眼に提示される複数の刺激の視方向の差（相対視方向）は、それらの網膜像の物理的な位置の違いによって予測される。しかし、単眼による観察でも成立する位置に関する錯視現象は、単眼刺激の相対視方向が網膜像の物理的な位置以外の要因にも依存することを示している。そのような錯視現象の例としてジョバネッリ錯視における直線性の崩壊現象（藤井, 2007; Giovanelli, 1966; Kanizsa, 1979）が挙げられる（図5A）。図5Aは、物理的には横2行に等間隔で並んでいる12個の黒点と、それらを取り囲む枠から構成されている。単眼の原理によれば、図5Aを単眼で観察したとき、それらの網膜像の物理的な垂直位置はすべて等しいため、1行内の黒点それぞれの間の垂直相対視方向はすべてゼロとなり、横一直線に並んでいるように知覚されることが予測される。しかし、図5Aを単眼で観察すると、1行内の黒点は横一直線に並んでいるようには知覚されない。この現象は、複数の単眼刺激の間の相対視方向が、それらの網膜像の物理的な位置のみによって決まるのではなく、周囲の刺激布置の影響を受けることを示している。

周囲の刺激布置に加え、対象の網膜像の属性も

また相対視方向に影響を与える。たとえば図5Bに示すような、上一組のガボールパッチの搬送波を一直線に（同じ位相に）する課題の場合、包絡線の中心位置の変化によって、一直線に知覚される（相対視方向がゼロと判断される）搬送波の位相が変化する（Whitaker et al., 2004）。また、2つの参照刺激の中心間隔を二等分する（間隔の中央の位置を判断する）課題において、参照刺激の中心間距離を一定に保ちながら大きさの比率を変化させると、知覚される中心位置はより小さい刺激の方向に偏位する（McGraw et al., 2012）。この課題では、両端の参照刺激との間の相対視方向が等しくなる位置を測定していると考えられることができる。さらに、古典的な図形残効（Köhler & Wallach, 1944）や、運動残効による位置の偏位現象（Nishida & Johnston, 1999; Whitney & Cavanagh, 2003）など、順応によって位置の知覚が影響を受けることを示す例も数多く報告されているが、これらの位置の知覚に関する研究はいずれも、単眼刺激間の相対視方向が、刺激の網膜像の物理的な位置によって決定されるものではないことを示す例といえる。

従来の視方向原理は刺激の網膜像の物理的位置にもとづいて視方向を予測するが、上述の刺激布置や刺激属性、順応などが単眼視方向に与える影響を考慮することが、視方向原理の予測力を高めるうえで必要と考えられる。

## 4.2 両眼刺激の視方向（両眼刺激のみが提示された場合）：融合の原理

### 4.2.1 自己中心視方向

融合像の視方向原理と一致する自己中心視方向に関連した実験結果としては、Erkelens and Collewijn (1985) が挙げられる。彼らは図6Aに示すような刺激を前額平行面上で反対方向に同期して動かし、融合刺激が正中面上を奥行方向に動いた場合の網膜像を再現した。その結果、融合刺激は奥行方向にも左右方向にも動かず静止して見えた。融合の原理によれば、それぞれの眼に与えられる単眼刺激が網膜上を反対方向に運動しても、刺激が融合している限りその視方向は変わらないため、左右方向には静止して見えることを予測する。というのは左右の眼の網膜上を互いに反対方向に同期して運動する刺激が融合する場合、その

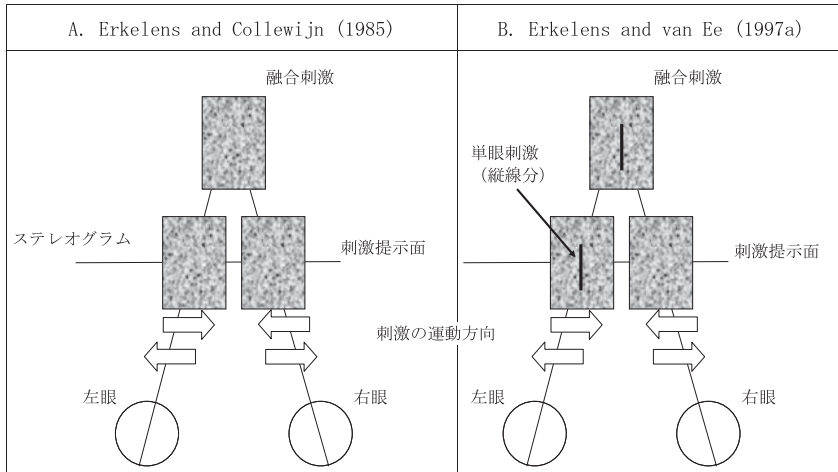


図6 両眼刺激が正中面上を奥行方向に動いた場合の網膜像のシミュレーション  
 右眼と左眼のそれぞれで、前額平行面上の刺激(RDS)を反対方向に同期して動かした場合 (Erkelens & Collewijn, 1985) (A)と同様のRDSに垂線(単眼刺激)を加えた刺激を前額並行面で動かした場合 (Erkelens & van Ee, 1997a) (B)。

視方向は、あたかも刺激を構成するそれぞれの単眼刺激の視方向が平均されたものとなるからである。したがって、Erkelens and Collewijn (1985)の実験結果は、融合の原理を支持するものである。なお、奥行方向に運動して見えないこと自体は視方向原理による説明の範囲ではなく、奥行知覚に関する問題である (下野・中溝・東山, 2000)。

一方、融合刺激の視方向は刺激特性や個人差により、必ずしも単純な平均とはならないことも同時に知られている (Howard & Rogers, 2012)。たとえば、Mansfield and Legge (1996) は融合刺激の視方向は左右の眼からの網膜像位置情報の加算ではないことを示した。先述したように彼らは、左右眼に与えられる像のコントラストが異なる際、コントラストの高い刺激の位置情報が視方向に大きな影響を持つことを示した (図4)。図4Aのステレオグラムにおいて、上下のガボールパッチの位置関係は、左右眼に与えられる像の間で反対方向になっている。融合の原理によれば、融合刺激の視方向は左右眼における網膜像位置が平均化されたものとなるので、このステレオグラムを融合すると、上下のガボールパッチは同じ視方向に(一直線に並んでいるように)知覚されることが予想される。しかし、実際には、上の刺激は下に対してより左寄りに知覚される。このガボールパッチの位置関係は、よりコントラストの高い左

眼のガボールパッチの位置関係と一致する。

Mansfield and Legge (1996) は、コントラストが融合像の視方向に影響するという事実と、網膜位置情報の信頼性に関する知見から、それぞれの眼に与えられる網膜像位置情報が信頼性によって重み付けされたあと平均化され、融合刺激の視方向が決定されるとする加重平均モデルを提案した。網膜位置情報の信頼性は、刺激のコントラストなどの信号と神経系の内部ノイズとの比率(信号対ノイズ比)で決定されると考えられている。彼らは、この知見から、左右眼の網膜像が与えられたときに知覚される網膜像位置が正規分布すると仮定することにより、両眼視方向の最尤推定値 $\bar{B}$ を

$$\bar{B} = \frac{\bar{L}/\sigma_L^2 + \bar{R}/\sigma_R^2}{1/\sigma_L^2 + 1/\sigma_R^2} = \frac{\bar{L}\sigma_R^2 + \bar{R}\sigma_L^2}{\sigma_L^2 + \sigma_R^2} \quad (1)$$

とした。ここで、 $\bar{L}$  および  $\bar{R}$  は知覚される左右の網膜像位置の分布の平均値、 $\sigma_L$  および  $\sigma_R$  はそれぞれの標準偏差をあらわす。(1)式では、左右眼の知覚される網膜像位置の平均値が、標準偏差の逆数によって重みづけされている。したがって、一方の眼の網膜位置情報の信頼性が高いときには、その眼における知覚される網膜像位置の分布の標準偏差が小さくなり、よりその眼における網膜像位置情報が大きく重み付けされる。彼らは(1)式の妥当性を検討するために単眼での副尺課題を

実施し、コントラストの関数として推定した網膜位置情報の信頼性を(1)式に代入することで両眼視方向の推定値 $\hat{B}$ を予測した。その結果、 $\hat{B}$ は実験によって測定された両眼視方向とよく一致した。このモデルでは、単眼のみに提示された刺激の場合、その眼の網膜上の位置がそのまま視方向として反映されるので、モデルの予測と単眼の原理による予測は同じである。同様に重み付けを扱ったモデルはSridhar and Bedell (2011)によっても提案されている。

Sridhar and Bedell (2011)はまた、視方向原理には網膜像位置の平均化とともに、“両眼眼球位置情報の平均化”が仮定されていることを指摘し、後者の仮定の妥当性を調べた。彼らは同一融合刺激を観察しているときの眼球位置(輻輳位置)を操作し、融合刺激の視方向を測定した。彼らは観察者の眼前(右眼か左眼、あるいは両眼)に異なる屈折率をもつプリズムを置き、眼球位置(輻輳位置)を変化させた。観察者は、その時の融合刺激の見えの自己中心視方向を、指の位置が見えない条件での指差しによって回答した。その結果、プリズムの屈折率から幾何光学的に予測される方向と見かけの方向とのずれは、約半数の観察者で、プリズムを右眼前に置く条件と左眼前に置く条件で差があった。このことは、それらの観察者において、右眼の眼球位置と左眼の眼球位置に与えた同程度の変化が、見かけの視方向に異なる大きさの影響を与えたことを意味する。ただし左右眼球位置の効果は、観察者間で平均すると視方向の原理の予測と一致した。これらのことは眼球位置情報が単純に平均されず、重み付け平均されることを示唆している。さらに最近Sridhar and Bedell (2012)は、眼球位置情報と網膜像位置情報は独立に処理されるのではなく、明るさやボケなどの網膜像情報の特性が両者に影響を与えると主張している。

#### 4.2.2 相対視方向

両眼刺激の相対視方向に関する研究は、相対視方向独特の特性を研究するというより、むしろ先述した、Mansfield and Legge (1996)などに見られるように副尺課題で測定された結果にもとづいて、自己中心視方向、及び相対視方向の特性を推論するということが多い。ここでは相対視方向課題である副尺課題によって得られたいくつかの

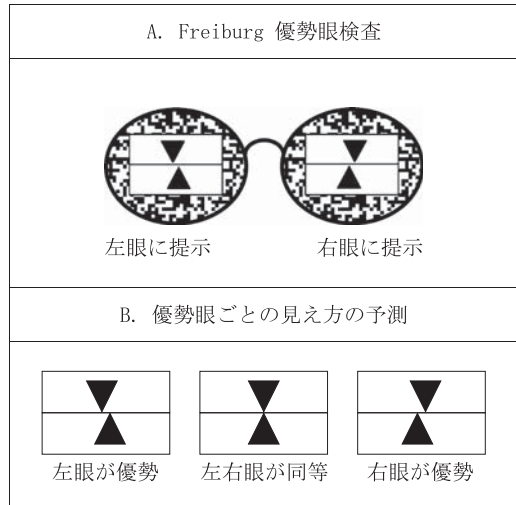


図7 Kommerell et al. (2003) で使われた Freiburg 優勢眼検査 (A) とその見えの模式図 (B)

知見について議論したい。

たとえば、Kommerell et al. (2003)は、眼優勢性(ocular prevalence)という指標を用いて、融合刺激の相対視方向は必ずしもそれぞれの単眼刺激の網膜像位置が平均されたものではないことを示している。眼優勢性とは、網膜像差を持っている対象が融合した時、その視方向は融合の原理の予測よりも左右のいずれかの眼の方向へずれて見える、その程度のことである。なお、3.で取り上げた優位眼を規定する概念である眼優位性(ocular dominance)が、両眼融合が成立しない場合に、優位眼の網膜像のみを用いて課題をおこなうことを指すのに対し、眼優勢性は、両眼の網膜像を融合し利用する際の、左右眼の重みづけの違いをあらわす。彼らは、Freiburg 優勢眼検査(図7A)とHaase Testで眼優勢性を測定した。たとえばFreiburg 優勢眼検査では、融合すると背景に対して上の三角形が後ろに、下の三角形が手前に見える。彼らは、上下三角形の相対網膜像差を保ったまま、観察者に上下の三角形の頂点が一直線上にくるように調整させた。融合の原理によれば、上下三角形のそれぞれの頂点は、相対的に左右に等しい量だけ“ずれ”ているときにその視方向が平均されて、一直線になるはずである。しかしながら、約6割の観察者において右あるいは左にずれて見ると報告された(図7B)。これらのことは、コントラストや輝度が同じでも、融

合像の視方向は、必ずしも左右網膜像の視方向平均ではないことを示唆している。

### 4.3 両眼刺激とともに提示された場合の単眼刺激の視方向

#### 4.3.1 自己中心視方向

視方向の原理によれば、両眼刺激とともに提示された単眼刺激の視方向は、単眼刺激が単独で提示された場合と同じになることが予測される。しかしながら研究間で、あるいは条件間で結果は異なる。たとえば、Erkelens (2000) は一方の眼の視軸上の対象を、他方の眼には対象の網膜像が結ばれないような条件で、手前から後ろへ、あるいは後ろから手前へ動かしても、サイクロピアン錯視 (cyclopean illusion) を観察できないと報告した。サイクロピアン錯視は、単眼刺激の視方向は両眼眼球位置に依存しており、刺激の物理的位置 (方向) とは異なるという錯覚である。たとえば、図 8A に示すように左眼の視軸上に 2 つの対象をおき、N の位置で対象を凝視した場合、F の位置に置かれた単眼刺激は共通軸上に、物理的位置より左に見える。同様に図 8B に示すように、F の位置を凝視したとき、N の位置に置かれた単眼刺激は共通軸上、物理的位置より右に見える。これ

らの錯視は歴史上何回も報告され、視方向原理によって説明されている (Howard & Rogers, 2002, 2012; Ono et al., 2007)。Erkelens (2000) は、彼の実験条件では、視方向原理が正しければ生じるはずのサイクロピアン錯視が観察されなかったという事実に基づき、従来の実験が統制の不十分な条件でおこなわれたものであり、視方向の判断が視方向原点からなされるという従来の考えは不適切であると主張した。

この主張に対し、Ono et al. (2007) は、Erkelens (2000) の実験条件を含むいくつかの条件で、サイクロピアン錯視が生じるかどうかを、単眼刺激の相対視方向及び自己中心視方向を測定することによって調べた。その結果、彼らの実験ではほとんどの条件でサイクロピアン錯視が観察された。彼らは、Erkelens においてサイクロピアン錯視が生じなかった理由を、実験で使われた刺激装置が従来のものと比べ小さかったために、錯視を観察しうるほどの十分な眼球運動が生じなかったためと推測している。ただし、彼らの実験においても Erkelens と同様、刺激の背景の視野にランダムドットパターンを置いた明室条件ではサイクロピアン錯視が生じ難かった。このような明室条件では背景に対する刺激の相対位置が明白なために、

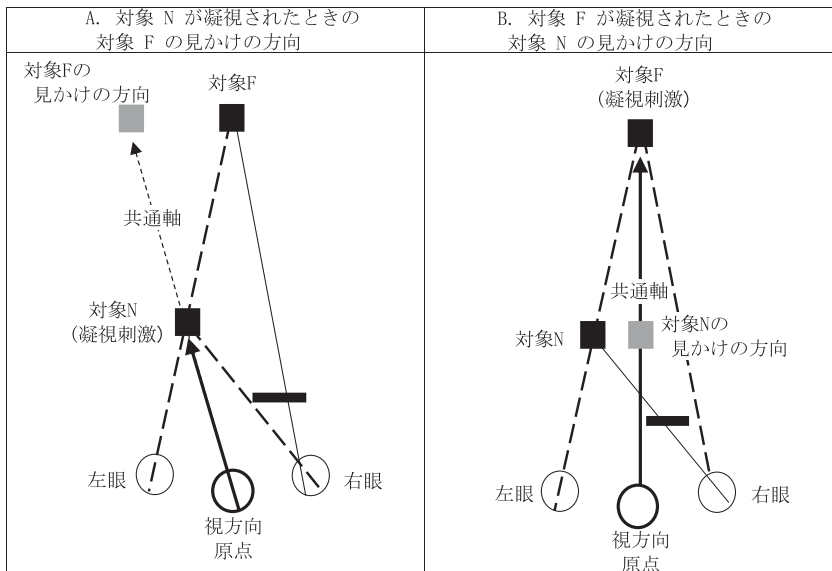


図 8 2 つの対象 (N と F) を左眼の視軸上に置き、右眼の前に対象が見えないような遮蔽物を置いた場合のサイクロプス錯視  
手前の対象 (N) を凝視した場合の 2 つの対象の視方向 (A) と後ろの対象 (F) を凝視した場合の 2 つの対象の視方向 (B)。

錯視が報告されにくかったと考えられる (Ono et al., 2002, 2007)。

単眼刺激の視方向原理と一致する結果は、Nakamizo et al. (1994) によっても見出されている。彼らは図 8 に示すような刺激配置を使い、単眼刺激と両眼刺激の間に凝視点を置き、単眼刺激と両眼刺激のそれぞれの視方向を測定した。彼らは刺激の真上に調整刺激を提示し、観察者にその視方向が単眼刺激か両眼刺激の視方向と一致するように調整させた。その結果、単眼刺激の視方向は原理と一致した (両眼刺激の視方向も原理と一致した)。また、Nakamizo et al. (2008) が報告した、観察者の斜位の量と単眼視方向の相関も原理の妥当性を支持するものである。

このように、多くの実験で、近傍に両眼刺激であろうとなかろうと、単眼刺激の視方向は単眼の原理に従うことが示されてきた。一方、この 20 年ほどで、ステレオグラムを使った両眼立体視空間において両眼刺激とともに単眼刺激を提示すると、その視方向は単眼の原理の予測とは異なる結果も蓄積され、それらを説明する仮説も複数提案されている。ここでは、そのような仮説のうち、代表的なものとして両眼視方向捕捉仮説、両眼表面-デフォルト仮説、およびレオナルド拘束条件について解説する。

**両眼視方向捕捉仮説**：両眼刺激と単眼刺激が同時提示されると、単眼刺激の視方向は視方向原理の予測と一致しない。このことを最初に指摘したのは Erkelens らのグループである (Erkelens & van Ee, 1997a, 1997b)。彼らは左右眼に同一のランダムドットパターンを提示し、それぞれ正中面を中心に同一量反対の方向に運動させた。また、それと同期して一方のランダムドットパターン上の単眼刺激を動かした (図 6B)。両眼視の常識から言えば、融合した両眼刺激は奥行方向に運動して見えるはずであるが、融合刺激は静止して見え、さらに単眼刺激も静止して見えた (図 6B)。視方向の原理によれば、単眼刺激が静止して見える条件は 1 つだけ考えられる。それは刺激の運動に伴って眼球が動き、刺激の網膜像が常に視軸上にある場合である。彼らは、眼球位置を測定し、刺激が視軸上にない場合でも単眼運動刺激が静止して見えることを示した。彼らは、この現象は視覚系が単眼刺激をあたかも融合した両眼刺激のよう

に扱ったためであると解釈した。両眼刺激として扱われたためにその視方向は、融合刺激の視方向に捕捉されたと考えたのである。彼らはこの現象を両眼方向捕捉、あるいは両眼捕捉 (binocular directional capture, あるいは binocular capture) と名づけた。Erkelens and van Ee (1997b) は、この現象の効果は両眼刺激と単眼刺激の距離が離れると減少することも報告している。

**両眼表面-デフォルト仮説**：奥行を持った両眼刺激と単眼刺激が同時に提示されたとき、単眼刺激の自己中心方向が両眼刺激の網膜像差によって影響を受けるということは Shimono et al. (2007) によっても報告されている。彼らは、図 9A に示すような立体視刺激 (random-dot stereogram, 以下 RDS) を観察しながら頭を側方に動かしたとき、1) 網膜像差を持った両眼刺激 (奥行刺激) とともに提示された単眼刺激は頭の運動と同期して動いて見えることを、2) 一方、網膜像差を持たない刺激 (基準刺激) とともに提示された単眼刺激は静止してみえることを示した。これらの知覚は、単眼刺激が両眼刺激あるいはその付近に定位されると仮定すると説明できる。もし、単眼刺激が両眼刺激付近に定位されるならば、その単眼刺激の運動 (自己中心視方向の変化) は両眼刺激のそれと同じように、頭部運動に同期して見えるはずである (たとえば、Shimono et al., 2002)。また、その運動量は両眼に関連する幾何学と現象的幾何学 (Gogel, 1990) によって予測できるはずである (図 9B)。実験の結果、単眼刺激 (線分刺激) の運動量は予測値、および奥行刺激の運動量より少ないが、奥行刺激のもつ網膜像差の関数として増加していた。また、基準刺激に置かれた単眼刺激はほとんど動いて見えない。これらの事実は両眼刺激付近に単眼刺激が定位されたことを示している。またこの条件下では、単眼自己中心視方向は、単眼の原理というよりむしろ、融合の原理による予測に近くなった。これらの事実は、視覚系は単眼刺激を両眼刺激として扱い、融合刺激付近に定位するという“両眼表面-デフォルト仮説 (default-surface hypothesis)”と一致する。Shimono et al. (2007) は単眼刺激の奥行には網膜像差情報がないので、積極的な過程を表現する“捕捉”という用語よりある種の“既定値”に落ち着くという意味のデフォルトという用語がふさ

わしいと議論している。

**レオナルド拘束条件**：レオナルド拘束条件とは、レオナルド・ダ・ヴィンチが提案した“3次元シーンを2次元のキャンパス上では表現することはできない”という考えから導かれた視方向に関する拘束条件である。Ono, Ohtsuka, and Lillakas (1998), Mapp et al. (2002), Ono, Wade, and Lillakas (2002) は、より手前にある面（前面刺激）がより後ろの面（背景刺激）の一部を隠すような3次元シーンでは、前面刺激を凝視するか、背景刺激を凝視するかによって凝視されていない面の視方向が変化することを見出した。彼らはそれぞれの面のいくつかの部分の自己中心視方向を測定した。その結果、背景面を凝視した時には両眼刺激である前面刺激はより縮む方向に、前面刺激を凝視した時には背面刺激の単眼刺激部分はより圧縮する方向に知覚された。このような現象は視方向原理では説明できない例外現象である。しかしながら、3次元知覚で生じるこの圧縮や側方のずれは非感性的縮小（amodal shrinking, Kanizsa, 1979）やPoggendorff錯視を説明できる可能性がある（たとえば、Ono et al. 1998；大塚・矢野, 1994；Takeichi & Nakazawa, 1994）。

先述した、Erkelens, Muijs, and van Ee (1996) も同様に、遮蔽面によって一方の眼にしか見えない単眼刺激は視方向の原理から外れるという主

張をしている。しかしながら、眼球位置を制御していなかったために、彼らの結果は視方向原理を使っても説明可能である（Howard & Rogers, 2012）。

#### 4.3.2 相対視方向

両眼刺激とともに提示された刺激の相対視方向に関する研究は、Hariharan-Vilupuru and Bedell (2009), Mapp et al. (2002), Ono et al. (2002), Shimono and Wade (2002), Shimono et al. (2005) などがおこなっている。これらの研究で使われた課題は副尺課題である。

**両眼表面-デフォルト仮説**：Shimono and Wade (2002), Shimono et al. (2005) は、図9Aに示すような矩形刺激（上の矩形を基準として下の矩形が網膜像差をもつ）のうち、左眼に提示する上下矩形のそれぞれに単眼刺激を提示し、観察者に上下の単眼刺激が一直線に見える位置まで下の刺激を動かすように教示した。単眼の原理によれば、刺激の物理的水平位置が等しいときに上下の単眼刺激が一直線に見える（両者の水平視方向が同じになる）と予測される。したがって、観察者は、下の単眼刺激の物理的な水平位置を上の単眼刺激と等しくなるように調整すると予測された。しかしながら、観察者の調整した値はその予測からずれ、RDSが非交差性網膜像差をもつとき（つまり融合した上の矩形に比べ、融合した下の

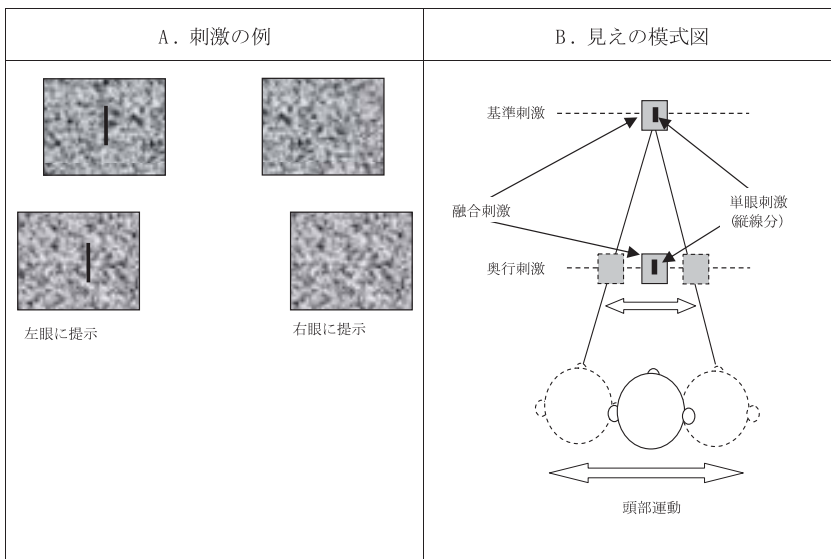


図9 Shimono et al. (2007) によって使われた刺激の例 (A) とその見えの模式図 (B)

矩形が後ろに見えるとき), 上の単眼刺激に比べ下の単眼刺激をより左に調整し, 交差性網膜像差を持つとき(上の矩形に比べ下の矩形が手前に見えるとき)下の刺激をより右に調整した。さらに網膜像差が小さい場合(-10 arcmin から +10 arcmin 程度)は融合の原理(融合した両眼刺激の視方向を予測する原理)の予測に近かった。Shimono et al. (2005)は, 因果分析を下に, 単眼刺激の奥行が単眼刺激の視方向を決定すると議論しているが, この考えは両眼表面-デフォルト仮説を支持するものである。彼らはまた RDS の密度, RDS の大きさが単眼刺激の視方向に影響することを示している。

朝倉・近江・下野(2004)は, このような現象を説明するために, 単眼刺激が近傍の輻輳している両眼刺激と同じ奥行に定位されるという知見(Howard & Ohmi, 1992)をもとに, 単眼刺激の視方向を推定するベイズモデルを構築した。このモデルは, 単眼刺激の網膜像に対して両眼網膜像差を割り当てており, 近傍の両眼網膜像差の信頼性が高い場合には, 単眼刺激の視方向が両眼視方向の原理による予測に近づく(単眼刺激の両眼捕捉が生起する)ことを予測する一方, 近傍の両眼刺激の信頼性が低い場合には, 単眼刺激の網膜像上の位置がそのまま視方向となる(単眼の原理にしたがう)ことを予測する。朝倉ら(2004), Mansfield and Legge(1996), および Sridhar and Bedell(2011)は, 相対位置信号の不確実性や近傍の両眼刺激の網膜像差情報の信頼性など, 刺激を構成する信号の信頼性によって視方向が影響を受けることを予測している点で, 従来の視方向原理に新たな知見を加えるものと考えられる。

また, Domini and Braunstein(2001)も両眼表面-デフォルト仮説と一致する考えを述べている。彼らは立体視空間で奥行方向に傾いた面(両眼刺激)上に単眼刺激(垂直線分)を提示し, その見かけの傾き(垂線の上端が下端に比べて右に見えるか左に見えるか)を測定した。その結果, 両眼刺激と単眼刺激が同時に提示されたとき, 単眼刺激の見かけの傾きは, その刺激が傾いた両眼刺激上に定位されたと仮定した場合の幾何学的な予測と一致していた。そのために彼らは, この現象を, 奥行手がかりを持たない単眼刺激が両眼刺激の一部として取り扱われたためであろうと解釈した。

ただし, この現象は単眼刺激と両眼刺激が同時に提示されたときにその効果が最大であり, 両眼刺激が時間的に先に提示されたり, 両刺激が時間的にずれを持って提示されたりした場合には効果が減じた。

アレトロピア仮説: Hariharan-Vilupuru and Bedell(2009)は, 両眼刺激とともに提示された場合の単眼刺激の視方向の偏位をもたす要因として, 単眼刺激が両眼刺激と同じ奥行に定位されることが必要であるかを, 水平網膜像差または垂直網膜像差を持つ両眼刺激を用いて検討した。彼女らの用いた刺激の模式図を図10に示す。もし単眼刺激の偏位が奥行を割り当てられることによって生起するなら, 奥行知覚をもたささない垂直網膜像差のみを持つ両眼刺激とともに提示された場合には, 垂直網膜像差の大きさによって単眼刺激の偏位量は変化しないことが想定される。しかしながら, 垂直網膜像差のみを持つ両眼刺激とともに提示された単眼刺激の視方向の偏位量は, 水平網膜像差の場合よりも増分が小さいものの,

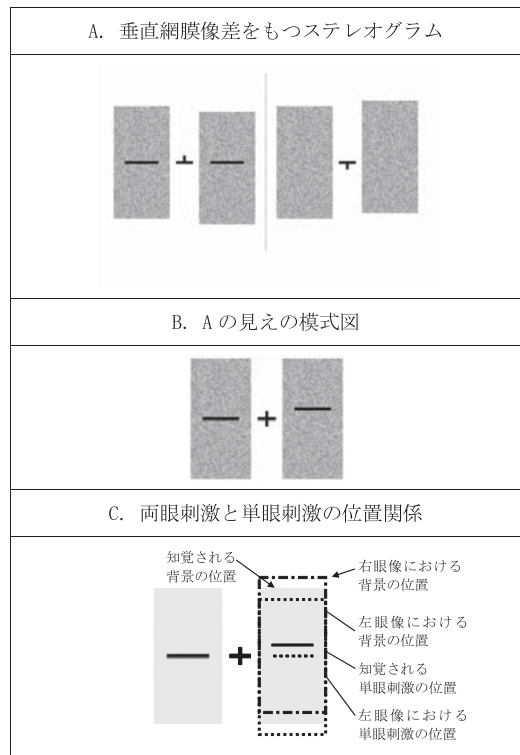


図10 アレトロピア仮説を支持するステレオグラム(A)とその見えの模式図(B), および左右眼に提示される刺激の位置関係(C)

両眼刺激の垂直網膜像差とともに大きくなることを見出された。両眼融合の際の左右の網膜上の位置情報の平均化（アレトロピア）は水平網膜像差でも垂直網膜像差でも生起することが知られていることから（Sheedy & Fry, 1979）、彼らは、両眼刺激による単眼刺激の視方向の偏位には、アレトロピアによる成分と、単眼刺激に奥行が割り当てられることによって生じる成分とが寄与するとした。

上記のうちいずれの仮説がより妥当性をもつか、あるいは両者が相補的かという理論的問題も興味深い。応用的観点からみると、上述した現象は単眼の原理にもとづいた眼球位置の推定法（ノニウス法）の妥当性に疑いを投げかけたという点で重要である。ノニウス法ではノニウス刺激と呼ばれる、一組の互いに融合しない単眼性の線分が使われる。ここでは、図 11A にある上半分または下半分の縦線分をノニウス刺激とした場合を解説する。図 11B のように、左右それぞれの眼に提示されたノニウス刺激が、各眼の視軸と同じ水平位置（すなわち凝視点を通る垂直線上）にあるとき、水平方向に関して視線と視軸とのなす角は左右眼においてともにゼロとなる。単眼の原理によれば、共通軸に対する単眼刺激の視方向は、その刺激の視線と視軸とのなす角に等しくなる。したがって、このとき左右眼のノニウス刺激は、とも

に凝視点と同じ水平視方向に知覚され、左右眼に提示されている縦線分は一直線に見えることが予測される。ノニウス法とは、ノニウス刺激が同じ水平視方向となるように観察者が凝視を維持することで、両眼の視軸のなす角（輻輳角）が一定になるよう眼球位置を保持する方法である。このときの輻輳角は、両眼間距離  $i$  とノニウス刺激の距離  $d$  によって推測される。

ノニウス法は、単眼刺激の視方向が単眼の原理による予測通りに知覚されることを前提とした方法である。したがって、同時に提示される両眼刺激によって単眼刺激の視方向知覚が影響を受けることは単眼の原理に立脚したノニウス法による眼球位置の推定が不正確になることを示唆する（Erkelens & van Ee, 1997a, 1997b; Ono & Mapp, 1995; Rogers & Bradshaw, 1999; Shimono et al., 1998）。したがってノニウス法を眼球位置の推定法として使うためには、単眼刺激の視方向が単眼の原理の予測から逸脱する条件を明らかにしておく必要がある。

使えない条件としては、たとえば、Erkelens and van Ee (1997a, 1997b) および Shimono et al. (1998) は、ノニウス刺激と両眼刺激を近距離で同時に置く条件を挙げている。先述したように、この条件では単眼の原理が成立しないので、眼球位置のモニターは不正確になる。したがって両者の距離を十分にとればノニウス法は使用可能と考えられる（Shimono et al., 1998）。一方、Raghuandan, Anderson, and Saladin (2009) は、図 9A に示すような刺激配置で単眼刺激（垂線）間の距離を縮めた場合、両眼捕捉現象は生じにくく、また垂線の空間周波数が高いほど生じやすいとした。彼らはこの結果にもとづいて、垂線間の距離が垂線を構成する空間周波数の 1 周期以内であれば両眼捕捉はほとんど起こらないと主張している。また、Jaschinski, Jainta, and Schürer (2006) は、両眼刺激と単眼刺激が同時に提示されるとき、単眼刺激を短時間提示すると、その視方向は単眼の原理と比較的一致することを示した。この結果は Domini and Braunstein (2001) の結果と一致するものである。同様に Shimono et al. (1998) は、ノニウス刺激の後に両眼刺激を短時間提示することで眼球位置の推定が正確にできるだろうと主張している。

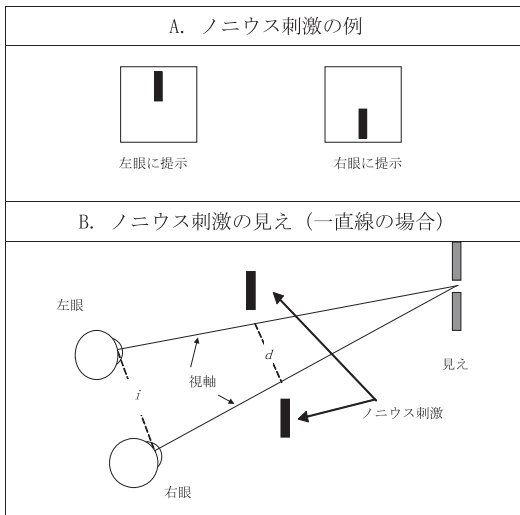


図 11 ノニウス刺激の例 (A)とその見えの模式図 (B)  $i$  は両眼間距離、 $d$  はノニウス刺激の距離をあらわす。



#### 4.4 複視を生じさせる刺激の視方向：複視の原理

複視を生じさせる対象の視方向は、複視の原理にしたがうならば、対象の2つの視方向は、左右眼における対象視線と視軸がなす角の分、共通軸から偏位したものとなる。(図 2B)。この原理からの逸脱現象としては、両眼分離提示法 (dichoptic presentation: 左右眼に独立した像を提示する手法) によって、融合域を超えた相対網膜像差を持つ垂直線分を提示した際に、左右眼に提示された線分がより互いに近づく方向に知覚されることが報告されている (Rose & Blake, 1988)。この現象は、両眼融合している対象において見られる視方向の平均化が、複視によって知覚される2つの像においても生起することを示唆している。類似の現象として、左右眼のそれぞれ耳側網膜に提示した像が、網膜像差 2 deg までの範囲において、実際の位置よりも中心窩の方向 (すなわち、複視によって知覚される2つの像が互いに近づく方向) に偏位して知覚されることが示されている (Rose & Halpern, 1992)。この中心窩への偏位は、刺激の空間周波数が低いときに大きく生起した。中心窩への偏位は、短時間提示された単眼刺激においても生起するが (Osaka, 1977)、その偏位量の時間・空間周波数依存性が上述の複視を生起させる対象と類似していた (Rose & Halpern, 1992)。Rose らは、複視刺激と単眼刺激で観察される偏位現象を同時に説明するモデルを提案している。

#### 5. 日常的な観察条件や行動への視方向原理の適用

すでに指摘したように、従来の視方向に関連した研究では、視方向原理の予測の妥当性を調べるために、暗室条件下で実験がおこなわれることが多く、また単一光源を使うことも多かった。このように実験が非常に人工的な条件でおこなわれたために、視方向研究では視方向原理の妥当性を日常的な条件で測定しようという努力が等閑にされてきた一面がある。そのために、われわれがさまざまな行動をとまなう視方向の判断をおこなうとき、たとえば対象の位置を指さしたり、対象に手を伸ばしたり、あるいは対象に照準を合わせたりするとき、対象の視方向は視方向原理と関連して

いるのか、あるいはその視方向は視方向原点から判断されているのか、などについては数えるほどの研究しかない。日常空間でのわれわれの行動特性を記述、説明することが心理学の重要な課題であるならば、今後の視方向研究は、視方向原理の妥当性を人工的な条件下ではなく、より日常空間での行動を含んだ条件でおこなわれるべきであろう。

そのような数少ない研究の中で、Soechting and Flanders (1989) は、視覚誘導性指差し (visually-guided manual pointing) をおこなうとき人間は視方向原点の位置から対象の方向を判断していることを示唆している。彼らは明室条件で、立体視的に提示した刺激を消した後、その位置を右手の人差し指で再生させた。その結果、視方向の原点 (彼らの用語では reference centre) は、顔の周りであった。さらに Carrozzo et al. (1999) らは、立体視的に提示された刺激を右手で掴もうとしたとき、右手が見えているなら、対象の方向の原点は、両眼の中央に位置することを示した。また、Mapp et al. (2007) は、明るい部屋でダートを投げたり、ターゲットにピストルやライフルを向けたときのデータにもとづき、視方向原点 (サイクロプスの眼) を視方向判断の原点として使っていると議論している。これらの研究は日常観察条件でおこなわれわれの行動のうち、方向の判断を含む行動においてはサイクロプスの眼の原理が適用可能であることを示唆している。

また最近、Shimono and Higashiyama (2011) は、視覚定位性指差し (visually-directed pointing) の場合の、指差した方向と対象の方向の角度誤差は、視方向原点の位置と筋運動方向原点 (kinesthetic egocenter) の位置の差に起因するという2重原点位置仮説 (dual egocenter hypothesis) を提案した。視覚定位性指差しは、たとえば暗闇の中に光点を一定時間提示し、その後光点を消した後、その方向を手の位置のフィードバックなしに指差しする課題である。この課題では、指差した方向と対象の方向は一致せず、特徴的な角度誤差が生じることが知られている (Foley & Held, 1972; Soechting & Flanders, 1989)。筋運動方向原点と視方向原点の違いが視覚定位性指差しで報告される角度誤差を生じるという考えは Howard (1982, pp. 454-456) によっても指摘されているが、

Shimono and Higashiyama (2011) はその考えの妥当性を実験的に検討した。彼らの研究は日常空間でおこなわれたものではないが、視方向原理を使って指差し行動を理解しようとした点で興味深い。ここでは、図 12 を用いて彼らの実施した実験を紹介する。

Shimono and Higashiyama (2011) は、視覚定位性指差しに際し、人間はまず視空間において対象の方向を視方向原点から判断し、次にその対象の方向を筋運動空間で表現すると仮定した。まず視空間では、物理的な正中面に対して、視覚対象の方位のなす角、および視覚的正中面 (visual midsagittal plane) のなす角をそれぞれ  $\alpha_1$ 、 $\theta_v$  とおくと、視覚対象の方向は視覚的正中面と視覚対象と視方向原点を結ぶ角度 ( $\alpha_1 - \theta_v$ ) として表象される。また、物理的な正中面に対して、筋運動的に指差しされた方向のなす角および筋運動的正中面 (kinesthetic midsagittal plane) のなす角をそれぞれ  $\alpha_2$ 、 $\theta_k$  とすると、筋運動空間において、筋運動的正中面と筋運動方向原点と指差しされる対象のなす角度は ( $\alpha_2 - \theta_k$ ) と表される。このとき、視覚対象の方向 ( $\alpha_1 - \theta_v$ ) と筋運動空間における指差しされる対象の方向 ( $\alpha_2 - \theta_k$ ) とが一致すると仮定した (図 12A)。ここで、視覚的正中面とは視覚を使ったときに真正面であると判断される面のことであり、筋運動的正中面とは筋運動を (ここでは手を) 使ったときに真正面であると判断される面のことである。

Shimono and Higashiyama (2011) はさらに、2 重原点位置仮説を筋運動定位性指差し (kinesthetically-directed pointing) に拡大した。筋運動定位性指差しとは、まず視覚を使わず筋運動的に対象を触りながら定位したのちに、視覚的に対象を観察しながら対象の方向を判断する行動である。このとき、手の位置のフィードバックはない。彼らは仮説を拡大することによって、内的に表象された  $\theta_v$ 、 $\theta_k$  を推定せずに、2 重原点位置仮説の妥当性を調べようとしたのである。筋運動定位性指差しにおいて、視覚を使わず筋運動的に対象を触りながら定位した際の、物理的な正中面に対して、定位対象の方向のなす角および筋運動的正中面のなす角をそれぞれ  $\beta_1$ 、 $\theta_k$  としたとき、筋運動的正中面に対する定位対象の方向は ( $\beta_1 - \theta_k$ ) と表される。また、視覚的に対象を観察しながら指をさす際の、物理的な正中面に対して指さされる対象の方向および視覚的正中面のなす角をそれぞれ  $\beta_2$ 、 $\theta_v$  としたとき、視覚的正中面に対して指差しされる対象の方向のなす角は ( $\beta_2 - \theta_v$ ) と表される。このとき、筋運動的に定位された対象の方位 ( $\beta_1 - \theta_k$ ) と視覚的に対象を観察しながら指差しされる対象の方向 ( $\beta_2 - \theta_v$ ) とが一致すると仮定した (図 12B)。もし角度に関連したこれらの仮定が正しいなら、それぞれの角度の関係は、

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \beta_2 - \beta_1 = \theta_v - \theta_k \quad (2)$$

と表現できる。Shimono and Higashiyama (2011)

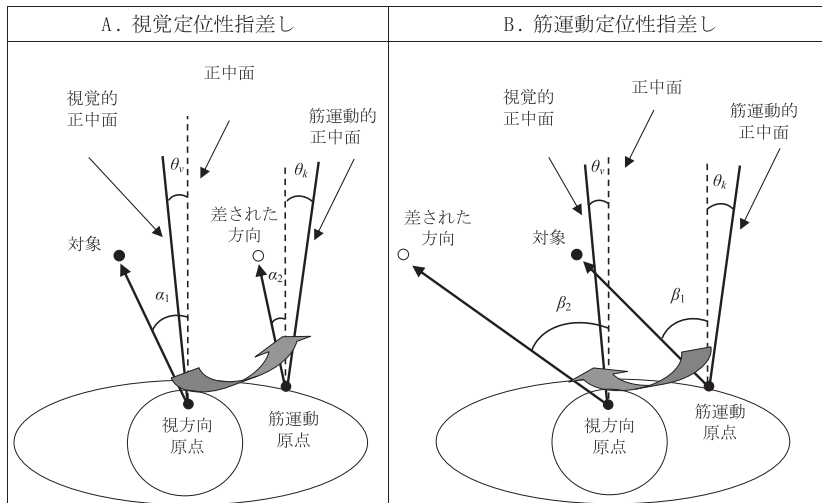


図 12 視覚定位性指差し (A) と筋運動定位性指差し (B) の模式図

は、これらの角度のうち、 $\alpha_1 - \alpha_2$ と $\beta_2 - \beta_1$ を測定し、両者の関係は、

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 1.24(\beta_2 - \beta_1) + C \quad (C \text{ は定数}) \quad (3)$$

となることを見出した。このことは視空間から筋運動空間への角度の“投影”と筋運動空間から視空間への“投影”は等価ではないことを示している。このことは式(2)とは矛盾するが、角度の投影が比較的単純な線形の式で表現できるという事実は、視覚定位性及び筋運動定位性指差しにおいて、視方向原点及び筋運動方向原点が使われているという2重原点位置仮説の考えと矛盾しない。ただ、彼らの実験は両眼を含む水平面付近でおこなわれたものであり、その考えが3次元空間にも拡大できるかについてはさらに調べる必要がある。

## 6. ま と め

この30年ほどの間に視方向の研究は一定の進展を見せ、従来の視方向原理の不十分さが指摘されるようになった。これらの研究は、視方向原理には修正が必要であることを示していると考えられる。ここでは、視方向原理のうち修正が必要である点について議論する。

まず、視方向原点の位置が一定であると仮定するサイクロプスの眼の原理は、多くの批判的研究があるものの、いまだにその妥当性を失っていないと考えられる。なぜなら、3.で概観した通り、それらの批判的研究は、相対視方向の測定から視方向原点の位置を推定する、または、視方向原点と優位眼とを混同するなど、研究手法に問題を持つものであったからである。一方で、複視あるいは単眼の原理、および融合の原理については、4.で述べたこれらの原理からの逸脱現象に対応するように修正する必要があると考えられる。また、5.で検討した日常観察条件への視方向原理の適用については、その妥当性を検討した研究は少ないものの肯定的な結論が得られている。一方、指差しや筋運動的に定位された方向には視方向原点と異なる原点が存在し、視空間から筋運動空間への変換にともなって組織的な逸脱がみられることも示唆されている。これらの点を考慮し、以下では、複視あるいは単眼の原理、および、融合の原理について、修正を提案する。

まず、複視あるいは単眼の原理に対する修正について記述する。この原理は、共通軸に対する刺激の視方向が視軸と視線とのなす角と等しくなることを予測する。しかし、4.3で述べたとおり、両眼刺激とともに単眼刺激が提示された場合、単眼刺激の視方向は、両眼刺激と単眼刺激との位置関係によって影響を受ける。すなわち、単眼刺激が両眼刺激に囲まれている場合、単眼刺激の視方向は、単眼の原理による予測よりも両眼刺激の視方向に偏位する(両眼捕捉)。さらに、複数の両眼刺激が隠す面(前面刺激)と隠される面(背面刺激)の関係にあり、前面刺激によって隠され、単眼のみに見える部分として単眼刺激が提示された場合、前面刺激を注視すると単眼刺激は縮小する方向に視方向が偏位する(レオナルド拘束条件)。複視を生起させる刺激の2つの視方向については、4.4で述べたとおり、短時間提示の場合に互いに近づく方向に偏位する。

次に、融合の原理に対する修正について記述する。この原理は、両眼融合が成立する刺激の共通軸に対する視方向が両眼における視軸と刺激の視線とのなす角度の平均となることを予測する。しかし、4.2で述べたとおり、両眼に与えられる像のコントラストが異なる場合、それらの角度は、各眼のコントラストの関数として表現できる網膜位置情報の信頼性によって重みづけられて平均化される。また、左右眼に与えられる像のコントラストが等しい場合でも、観察者ごとに平均化の際の左右眼の重みづけが異なることがある(眼優勢性)。

今後の課題は、これらの修正案をもとに定量的な予測を可能にするモデルを構築することである。4.2で述べた融合刺激の視方向に対する左右眼のコントラスト差の影響についてはMansfield and Legge (1996)が、4.3で述べた単眼視方向の両眼捕捉現象については、朝倉ら(2004)が、それぞれの実験結果と整合する予測モデルを提案した。しかし、それらはいずれも副尺課題で測定される相対視方向を取り扱ったモデルであった。したがって、それらを自己中心視方向に適用することは難しい。なぜなら、3.で述べたとおり、副尺課題で測定された相対視方向の変化は、判断対象となる刺激(標準刺激)と回答のために観察する刺激(比較刺激)の、どちらの自己中心視方向の

変化によっても生起しうるからである。したがって、本節で述べた修正案を自己中心視方向を予測する視方向原理に適用するには、標準刺激と比較刺激のいずれの自己中心視方向の変化が相対視方向の変化をもたらしているのか測定し、その結果を視方向原理に組み込む必要がある。

さらに、5. で述べたように、視覚的に提示された対象の方向を、手の運動（すなわち筋運動感覚）を使って示す際には、視空間と筋運動空間で方向に関する情報の変換がおこなわれている可能性がある（Howard, 1982; Shimono and Higashiyama, 2011）。このことは視方向原理が他のモダリティーも拡張可能なことを示唆している（Shimono and Higashiyama, 2011; Sukemiya, et al., 2008）。ただし、異なるモダリティー間の方向のマッチングに関する研究は少なく、今後の展開が望まれる。

#### 謝 辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B)平成23-26年度 課題番号23330215, 研究代表者 下野孝一)の助成を受けておこなわれた。本論文の草稿に対して、相田紗織氏（東京海洋大学大学院・日本学術振興会）および渡邊佳奈氏（東京海洋大学大学院）から有益な助言をいただいた。ここに感謝申し上げます。

#### 文 献

朝倉暢彦・近江政雄・下野孝一（2004）単眼視方向知覚のベイズモデル。 *Vision*, 16, 41.

Banks, M. S., Ghose, T., & Hillis, J. M. (2004). Relative image size, not eye position, determines eye dominance switches. *Vision Research*, 44, 229-234.

Banks, M. S., van Ee, R., & Backus, B. T. (1997). The computation of binocular visual direction: a re-examination of Mansfield and Legge (1996). *Vision Research*, 37, 1605-1613.

Barbeito, R., & Ono, H. (1979). Four methods of locating the egocenter: A comparison of their predictive validities and reliabilities. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 11, 31-36.

Carrozzo, M., McIntyre, J., Zago, M., & Lacquaniti, F. (1999). Viewer-centered and body-centered frames of reference in direct visuomotor transformations. *Experimental Brain Research*, 129, 201-210.

Domini, F., & Braunstein, M. L. (2001). Influence of a

stereo surface on the perceived tilt of a monocular line. *Perception & Psychophysics*, 63, 607-624.

Erkelens, C. J. (2000). Perceived direction during monocular viewing is based on signals of the viewing eye only. *Vision Research*, 40, 2411-2419.

Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985). Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, 25, 583-588.

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

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

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

Erkelens, C. J., & van Ee, R. (2002). The role of the cyclopean eye in vision: sometimes inappropriate, always irrelevant. *Vision Research*, 42, 1157-1163.

Foley, J. M., & Held, R. (1972). Visually directed pointing as a function of target distance, direction, and available cues. *Perception & Psychophysics*, 12, 263-268.

藤井輝男（2007）「枠組みによる直線性の崩壊」現象と図形構造 敬愛大学研究論集, 70, 129-150.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin. 古崎 敬・古崎愛子・辻敬一郎・村瀬 旻(訳) (1985) 生態学的視覚論——ヒトの視覚世界を探る——サイエンス社.

Giovanelli, G. (1966). Stati di tensione e di equilibrio nel campo percettivo. *Rivista di Psicologia*, 60, 327-335.

Gogel, W. C. (1990). A theory of phenomenal geometry and its applications. *Perception & Psychophysics*, 48, 105-123.

Gogel, W. C., & Tietz, J. (1974). The effect of perceived distance on perceived movement. *Perception & Psychophysics*, 16, 70-78.

Hariharan-Vilupuru, S., & Bedell, H. E. (2009). The perceived visual direction of monocular objects in random-dot stereograms is influenced by perceived depth and allelotropia. *Vision Research*, 49, 190-201.

Higashiyama, A., & Shimono, K. (1994). How accurate is size and distance perception for very far terrestrial objects? Function and causality. *Perception & Psychophysics*, 55, 429-442.

Howard, I. P. (1982). *Human visual orientation*. Chichester, England: Wiley.

Howard, I. P., & Ohmi, M. (1992). A new interpreta-

- tion of the role of dichoptic occlusion in stereopsis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 33, 1370.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2002). *Seeing in depth : Vol. 2. Depth perception*. Toronto : Porteous.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2012). *Perceiving in depth : Vol. 2. Stereoscopic vision*. New York : Oxford University Press.
- Howard, I. P., & Templeton, W. B. (1966). *Human spatial orientation*. New York : Wiley.
- Jaschinski, W., Jainta, S., & Schürer, M. (2006). Capture of visual direction in dynamic vergence is reduced with flashed monocular lines. *Vision Research*, 46, 2608-2614.
- Kanizsa, G. (1979). *Organization in Vision : Essays on Gestalt Perception*. New York : Praeger. 野口 薫 (監訳) (1985) 視覚の文法 —— ゲシュタルト知覚論 —— サイエンス社.
- Khan, A. Z., & Crawford, J. D. (2001). Ocular dominance reverses as a function of horizontal gaze angle. *Vision Research*, 41, 1743-1748.
- Khokhotva, M., Ono, H., & Mapp, A. P. (2005). The cyclopean eye is relevant for predicting visual direction. *Vision research*, 45, 2339-2345.
- Köhler, W., & Wallach, H. (1944). Figural after-effects : an investigation of visual responses. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 88, 306-335.
- Kommerell, G., Schmitt, C., Kromeier, M., & Bach, M. (2003). Ocular prevalence versus ocular dominance. *Vision Research*, 43, 1397-1403.
- Mansfield, J. S., & Legge, G. E. (1996). The binocular computation of visual direction. *Vision Research*, 36, 27-41.
- Mapp, A. P., Barbeito, R., Bedell, H. E., & Ono, H. (1989). Visual localization of briefly presented peripheral targets. *Biological Cybernetics*, 60, 261-265.
- Mapp, A. P., & Ono, H. (1999). Wondering about the wandering cyclopean eye. *Vision Research*, 39, 2381-2386.
- Mapp, A. P., Ono, H., & Barbeito, R. (2003). What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review. *Perception & Psychophysics*, 65, 310-317.
- Mapp, A. P., Ono, H., & Howard, I. P. (2002). Binocular visual direction. In Howard, I. P. & Rogers, B. J. (Eds.), *Seeing in depth : Vol. 2. Depth perception* (pp. 85-99). Toronto : Porteous.
- Mapp, A. P., Ono, H., & Khokhotva, M. (2007). Hitting the target : Relatively easy, yet absolutely difficult. *Perception*, 36, 1139-1151.
- McGraw, P. V., Roach, N. W., Badcock, D. R., & Whitaker, D. (2012). Size-induced distortions in perceptual maps of visual space. *Journal of Vision*, 12(4), 8.
- 中溝幸夫 (2003) 視覚迷宮 —— 両眼視が生み出すイリュージョン プレーン出版.
- Nakamizo, S., Kawabata, H., & Ono, H. (2008). Misconvergence to the stimulus plane causes apparent displacement of the stimulus elements seen monocularly. *Japanese Psychological Research*, 50, 49-62.
- Nakamizo, S., Shimono, K., Kondo, M., & Ono, H. (1994). Visual directions of two stimuli in Panum's limiting case. *Perception*, 23, 1037-1048.
- Nishida, S., & Johnston, A. (1999). Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern. *Nature*, 397, 610-612.
- 大塚作一・矢野澄夫 (1994) 立体画像の知覚ひずみと Pogendorff 錯視, テレビジョン学会技術報告, 18, 25-30.
- Ono, H., & Barbeito, R. (1982). The cyclopean eye vs. the sighting-dominant eye as the center of visual direction. *Perception & Psychophysics*, 32, 201-210.
- Ono, H., Lillakas, L., Grove, P. M., & Suzuki, M. (2003). Leonardo's constraint : two opaque objects cannot be seen in the same direction. *Journal of Experimental Psychology : General*, 132, 253-265.
- Ono, H., & Mapp, A. P. (1995). A restatement and modification of Wells-Hering's law of visual direction. *Perception*, 24, 237-252.
- Ono, H., Mapp, A. P., & Howard, I. P. (2002). The cyclopean eye in vision : the new and old data continue to hit you right between the eyes. *Vision Research*, 42, 1307-1324.
- Ono, H., Mapp, A. P., & Mizushima, H. (2007). The cyclopean illusion unleashed. *Vision Research*, 47, 2067-2075.
- Ono, H., Ohtsuka, S., & Lillakas, L. (1998). The visual systems solution to Leonardo da Vinci's paradox and the problems created by the solution. *Proceedings of the international workshop on advances in research on visual cognition*, 125-136.
- Ono, H., & Wade, N. J. (2012). Two historical strands in studying visual direction. *Japanese Psychological Research*, 54, 71-88.
- Ono, H., Wade, N. J., & Lillakas, L. (2002). The pursuit of Leonardo's constraint. *Perception*, 31, 83-102.
- Osaka, N. (1977). Effect of refraction on perceived locus of a target in the peripheral visual field. *The Journal of Psychology*, 95, 59-62.
- Raghuandan, A., Anderson, C. S., & Saladin, J. J. (2009). Spatial scaling of the binocular capture effect. *Optometry and Vision Science*, 86, 279-285.
- Rogers, B. J., & Bradshaw, M. F. (1999). Disparity minimisation, cyclovergence, and the validity of

- nonius lines as a technique for measuring torsional alignment. *Perception*, *28*, 127-141.
- Rose, D., & Blake, R. (1988). Mislocalization of diplopic images. *Journal of the Optical Society of America A*, *5*, 1512-1521.
- Rose, D., & Halpern, D. L. (1992). Stimulus mislocalization depends on spatial frequency. *Perception*, *21*, 289-296.
- Sheedy, J. E., & Fry, G. A. (1979). The perceived direction of the binocular image. *Vision Research*, *19*, 201-211.
- 下野孝一 (1998) 視方向原理の例外現象について *Vision*, *10*, 21-28.
- Shimono, K., & Higashiyama, A. (2011). Dual-egocentre hypothesis on angular errors in visually directed pointing. *Perception*, *40*, 805-821.
- Shimono, K., Higashiyama, A., & Tam, W. J. (2001). Location of the egocenter in kinesthetic space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 848-861.
- 下野孝一・中溝幸夫・東山篤規 (2000) 距離知覚とバーゼンス 心理学評論, *43*, 335-348.
- Shimono, K., Ono, H., Saida, S., & Mapp, A. P. (1998). Methodological caveats for monitoring binocular eye position with Nonius stimuli. *Vision Research*, *38*, 591-600.
- Shimono, K., Tam, W. J., Asakura, N., & Ohmi, M. (2005). Localization of monocular stimuli in different depth planes. *Vision Research*, *45*, 2631-2641.
- Shimono, K., Tam, W. J., & Ono, H. (2007). Apparent motion of monocular stimuli in different depth planes with lateral head movements. *Vision Research*, *47*, 1027-1035.
- Shimono, K., Tam, W. J., Stelmach, L., & Hildreth, E. (2002). Stereillusory motion concomitant with lateral head movements. *Perception & Psychophysics*, *64*, 1218-1226.
- Shimono, K., & Wade, N. J. (2002). Monocular alignment in different depth planes. *Vision Research*, *42*, 1127-1135.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989). Sensorymotor representations of the kinesthetic egocenter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 848-861.
- Sridhar, D., & Bedell, H. E. (2011). Relative contributions of the two eyes to perceived egocentric visual direction in normal binocular vision. *Vision Research*, *51*, 1075-1085.
- Sridhar, D., & Bedell, H. E. (2012). Binocular retinal image differences influence eye-position signals for perceived visual direction. *Vision Research*, *62*, 220-227.
- Sukemiya, H., Nakamizo, S., & Ono, H. (2008). Location of the auditory egocentre in the blind and normally sighted. *Perception*, *37*, 1587-1595.
- Takeichi, H., & Nakazawa, H. (1994). Binocular displacement of unpaired region. *Perception*, *23*, 1025-1036.
- van Ee, R., Banks, M. S., & Backus, B. T. (1999). Perceived visual direction near an occluder. *Vision Research*, *39*, 4085-4097.
- Wade, N. J. (1998). *A Natural History of Vision*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wade, N., & Ono, H. (2012). Early studies of binocular and stereoscopic vision. *Japanese Psychological Research*, *54*, 54-70.
- Whitaker, D., McGraw, P. V., Keeble, D. R. T., & Skillen, J. (2004). Pulling the other one: 1st- and 2nd-order visual information interact to determine perceived location. *Vision Research*, *44*, 279-286.
- Whitney, D., & Cavanagh, P. (2003). Motion adaptation shifts apparent position without the motion aftereffect. *Perception & Psychophysics*, *65*, 1011-1018.

— 2013. 5. 29 受稿, 2013. 9. 10 受理 —