

運動視差からの奥行知覚研究の動向

一 川 誠

Centre for Vision Research, York University

4700 Keele St., North York, Ontario, M3J 1P3, CANADA

1. はじめに

この解説では、観察者の運動が運動視差からの奥行知覚に及ぼす効果や運動視差と他の奥行手がかりとの統合過程に関する著者等の研究成果を中心に、運動視差からの奥行知覚についての最近の研究動向を概観する。

頭部移動によって網膜像に生じるずれ、すなわち運動視差 (motion parallax) が奥行知覚の有効な情報源となることは、すでに 19 世紀において Helmholtz¹⁾ や Wheatstone²⁾ によって指摘されていた。また、今世紀の初頭には、観察者頭部と刺激とを同期させて動かした実験観察によって、運動視差の奥行手がかりとしての有効性が示された³⁾。80 年代以降の運動視差からの奥行知覚研究に特に重要な影響を及ぼしたのは Rogers and Graham の研究である⁴⁾。彼等は、観察者頭部とランダムドット刺激とを同期させて水平方向に動かすことによって、観察者が一貫した起伏の形状、奥行方向と奥行量の知覚を得ることができることを確認したのである。この研究は、刺激内に運動視差以外に明確な奥行手がかりがなくても、観察者が安定した奥行知覚を成立させることができるということを明らかにした点で、その後の運動視差からの奥行知覚研究の端緒となったと言える。また、他の研究^{5, 6)}で、静止した観察者に運動刺激を提示した実験では一貫した奥行知覚が得られなかったことを考えると、Rogers and Graham の研究は、観察者の頭部運動が安定した奥行知覚の成立に重要であることを示唆している。

しかしながら、その後、80 年代に行われた運

動視差からの奥行知覚 (運動立体視) 研究では観察者の運動要因が奥行知覚成立にどのように寄与しているのかが検討されることはほとんどなかった。この時期に多く取り上げられたのは、運動視差の提示する起伏の形状要因がどのように運動視差からの奥行知覚の成立に寄与するかという問題であった。特に、幾何学的な性質が運動視差に類似している両眼視差 (binocular disparity) からの奥行知覚 (両眼立体視) との比較に基づいて多くの検討が行われた。

2. 運動立体視と両眼立体視

運動視差と両眼視差との幾何学的性質の類似を図 1 に示す。図 1 は単眼視で、頭部が水平方向に移動した場合に生じる運動視差を表している。頭部運動距離が両眼間距離に等しい場合、運動視差の大きさは両眼視差の大きさと等しくなることが分かるであろう。このような幾何学的な類似が運動視差と両眼視差との間にあるため、両眼視差からの奥行知覚過程と比較するという研究パラダイムは、運動視差からの奥行知覚を理解するのに有効であった。

例えば、Rogers and Graham は、起伏の空間周波数に対する感度特性において、運動視差からの奥行知覚と両眼立体視とが類似していることを見い出した⁷⁾。すなわち、ランダムドット刺激を用いて様々な空間周波数にしたがって垂直方向の正弦波状に起伏する表面を運動視差もしくは両眼視差によって提示し、異なる空間周波数の起伏について奥行知覚の

差からの奥行知覚の成立に観察者の運動に関わる要因がどのように寄与しているのかということは大変興味深い問題である。

Ono and Ujike^{14, 15)}, Ujike and Ono¹⁶⁾ は頭部をいろいろな速度で移動させ、運動視差からの奥行知覚と付随運動 (concomitant motion) 知覚の閾値 (等価視差) がどのように変化するかを調べた。その結果、付随運動知覚閾値が奥行知覚閾値よりも高いこと、頭部移動速度が約 10 cm/s よりも遅い場合、頭部移動速度の増加にしたがって奥行知覚閾値が低下することを見出した (図 2)。それ以上の速さの頭部移動では、奥行知覚閾値は一定であった。このことは、一定の大きさの奥行を持つ対象を観察する際に、頭部移動速度が遅くなると、運動視差からの奥行が見えにくくなることを意味している。

この頭部移動速度による奥行知覚閾値への効果は、前庭系や自己受容感覚的身体運動情報に依存するのだろうか。あるいは、網膜像に含まれる運動情報に依存するのだろうか。

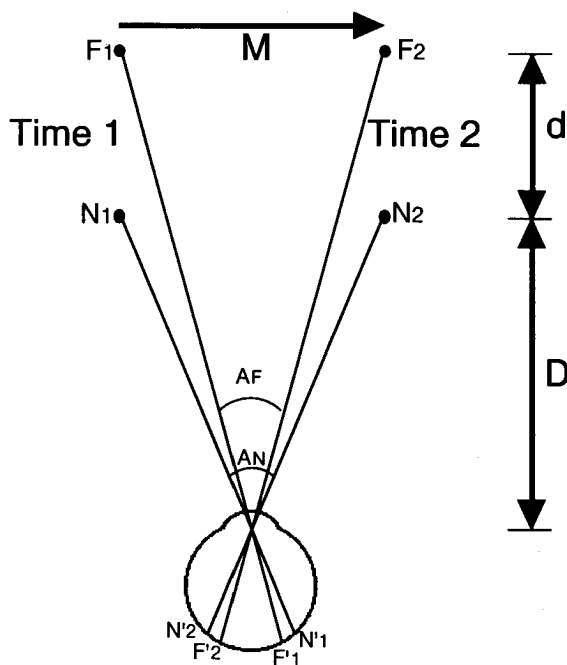


図3 対象移動による運動視差提示。対象移動によって生じる網膜像の運動は、頭部移動によって生じた網膜像運動 (図1) と等しい。

この問題を検討するには、頭部移動によって提示される運動視差に対する感度と、頭部移動に依存しない運動的奥行手がかりに対する感度を比較すればよい。頭部を固定して移動する対象を観察する場合でも、頭部移動しながら静止した対象を観察する場合と同様の網膜像の運動を成立させることが可能である (図3)。この網膜像運動 (対象移動による運動視差) が、奥行知覚の有効な情報源となりうることはすでに Rogers and Graham によって確認されている¹⁾。刺激の移動によって提示された運動視差についても、頭部移動による運動視差と同様に、移動速度の効果があるとすれば、この効果は網膜像に含まれる運動情報に依存していると言うことができよう。

これら2通りの運動視差に対する奥行知覚感度を測定する実験を行ったところ、刺激の移動によって運動視差を提示した場合にも、頭部移動によって運動視差を提示した場合と類似した移動速度の効果が認められた¹⁷⁾。すなわち、刺激移動速度が遅い場合 (~約 10 cm/s), 奥行知覚と付随運動知覚の閾値は刺激移動速度の増加に伴って低下した (図4)。それ以上の速さの刺激移動条件では、閾値の一貫した低下は認められなかった。こうした結果は、刺激の移動によって運動視差を提示した場合でも、観察者頭部と刺激との間の相対的な移動速度にしたがって閾値が減少することを示している。したがって、先行研究の見出した頭部移動速度の増加にともなった閾値の低下は網膜上の運動要因に依存すると考えられる。ただし、頭部移動が速い条件での閾値は、刺激を同じ速さで動かした場合に得られる閾値よりも若干低くなる。このことは、頭部移動が速い場合に、頭部移動に関する網膜像内情報以外の何らかの要因が、奥行知覚を促進することを示唆している。また、頭部移動によって運動視差を提示した場合、対象移動によって運動視差を提示した場合よりも見かけの奥行量が大きくなる¹⁾。移動速度による奥行知覚閾値への効果は主に網膜像に含ま

れる情報に依存するものの、それ以外の頭部移動情報も奥行知覚に貢献していると言える。

最近の研究では、運動視差刺激の提示時間の効果が、頭部移動速度に依存していることが見い出された¹⁸⁾。すなわち、頭部運動が遅い(16 cm/s 未満)場合にのみ、刺激提示時間と奥行知覚閾値との間にトレードオフ関係が成立するのである。このように、運動視差からの奥行知覚にとって、頭部や刺激の移動速度は、その他の要因が奥行知覚に及ぼす効果をも決定するほど重要な要因である。しかしながら、移動速度以外の観察者運動要因の効果については、まだほとんど調べられていないのが現状である。他方、頭部を移動させた場合よりも、頭部位置を固定して回転する対象を観察した場合のほうが奥行知覚課題のパフォーマンスが良くなることが報告されている^{19,20)}。運動視差からの奥行知覚の成立過程を理解するには、観察者や対象の移動・運動に関する諸要因が奥行知覚の成立にどのように関与しているのかについてのシステマティックな研究が必要と言える。

4. 他の手がかりとの統合過程

運動視差からの奥行情報と他の手がかりからの奥行情報との統合に関する問題も最近の運動視差研究における主要なテーマの一つである。奥行知覚においては、一般的に個別の手がかり別に相互独立的な処理過程(モジュール構造)が想定されている(図5)。このような想定に基づく奥行情報の統合過程のモデルでは、異なる手がかりから得られた情報が、線形的(加算的)な仕方で相互に補い合うように統合されると考えられている²¹⁾。実際、運動視差が両眼視差^{22,23)}や動的遮蔽²⁴⁾と異なる奥行量を提示した場合に生じる見かけの奥行量に関する研究では、線形的な統合が行われていることを仮定したモデルと一見両立する結果が得られている。

しかしながら、最近の研究で興味深いのは、運動視差と両眼視差との統合に関しては、相互独立的な処理がなされた後に統合されるという想定に疑いを投げかけるような結果が積み重ねられつつあることである。たとえば、運動的な手がかりからの奥行情報の処理は、両眼視差情報の処理と相互に影響しあっていることが示されている²⁵⁾。また、運動視差と両眼視差とを同時に提示した場合、

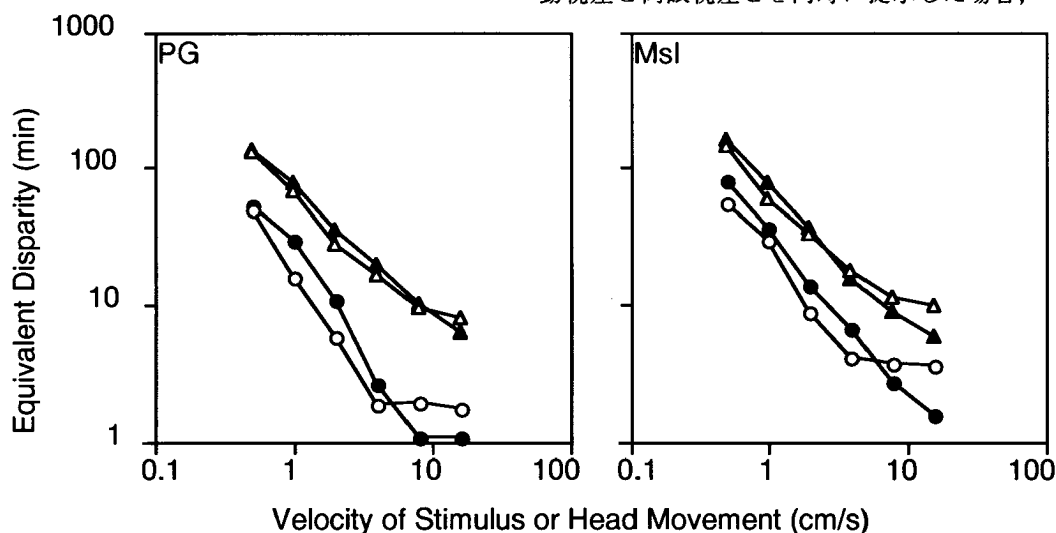


図4 頭部移動速度および対象移動速度と運動視差からの奥行知覚閾値。2名の観察者(PG, Msl)の結果を示す。対象移動による運動視差からの奥行知覚閾値は○, 付随運動閾値は△, 頭部移動による運動視差からの奥行知覚閾値は●, 付随運動閾値は▲が示す。

奥行検出課題でのパフォーマンスが、確率加重が予測するそれよりも良くなる^{26,27)}。これら2つの手がかりを同時に提示した場合に奥行知覚感度が上昇するという実験結果は、運動立体視と両眼立体視とがそれぞれ相互独立的な個別のモジュール構造を持つものではなく、むしろ何らかの過程を共有して相互に影響しあうような処理が行われていることを示唆している。2節で述べた運動立体視と両眼立体視との間の類似性は、この共通の過程に属する特性を示しているのかもしれない。運動視差と両眼視差とが同時に提示された場合でも、常に奥行知覚感度が上昇するわけではなく、感度の上昇のためには、これらの手がかりが同じ形状を提示することが必要である²⁸⁾。2節で述べたように、運動立体視と両眼立体視とが空間周波数に対して相互に類似した感度を持つことも合わせて考えると、起伏形状に関わる情報の処理過程が運動立体視と両眼立体視とに共有されている可能性がある。

5. おわりに

観察者自身の運動がどのように知覚の成立に関与しているのかということは、これまでの知覚研究があまり取り上げてこなかった問題である。しかしながら、3節で述べたように、運動視差研究は奥行知覚の成立というご

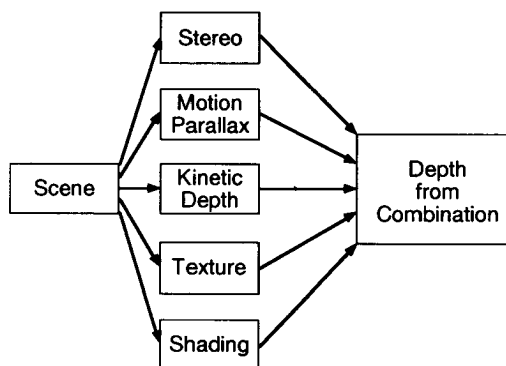


図5 奥行知覚のモジュール構造仮説

く限定された領域ながらこの問題についての知見を深めつつある。また、4節で見たように、運動立体視と両眼立体視との密接な関係を考慮すると、手がかり別の相互独立的なモジュール構造を奥行知覚過程が持つという想定を批判的に検討する必要があるように思われる。この解説では詳しく触れられなかったが、運動視差からの奥行知覚と運動知覚との関係についても、それらが相互独立であるか否かが明確でないことが示されている²⁹⁾。これも、奥行手がかりの処理のモジュール構造の仮定への問題提起とは別の方向から、知覚過程の基礎にモジュール構造を想定することへの問題提起を行うものと言える。このように、運動視差からの奥行知覚は、今後の知覚研究を考える上でいくつもの興味深いトピックを提供している。

文 献

- 1) H. von Helmholtz: Helmholtz's treatises on physiological optics, Vol. 3. J. P. C. Southall (ed & trans). Dover, NY, 1866/1925.
- 2) C. Wheatstone: On some remarkable, and hitherto unresolved phenomena of binocular vision. *Royal Society of London Philosophical Transactions*, 128, 371-394, 1838.
- 3) L. Heine: Über Wahrnehmung und Vorstellung von Entfernungsunterschieden. *Albrecht von Grafe's Archiv für Klinische und Experimentelle Ophthalmologie*, 61, 484-498, 1905.
- 4) B. J. Rogers and M. E. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134, 1979.
- 5) E. E. Gibson, J. J. Gibson, W. Smith and H. R. Flock: Motion parallax as a determinant of perceived depth. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 40-51, 1959.
- 6) J. J. Gibson and W. Carel: Does motion perspective independently produce the impression of a receding surface? *Journal of Experimental Psychology*, 44, 16-18, 1952.
- 7) B. J. Rogers and M. E. Graham: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270, 1982.

- 8) B. J. Rogers and M. E. Graham: Anisotropy in the perception of three-dimensional surfaces. *Science*, 221, 1409-1411, 1983.
- 9) 一川 誠: 2次運動が示す運動視差および動的遮蔽の手がかりからの奥行知覚. *ATR 人間情報通信研究所テクニカルレポート*, 1995.
- 10) M. Ichikawa, H. Ono, S. Nishida and T. Sato: Depth perception from second order motion yoked to head movement. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 37, 746, 1996.
- 11) 佐藤隆夫, 西田真也: 二次の両眼立体視: RWS に対するチェックサイズおよび視差の効果. *Vision*, 5, 63, 1993.
- 12) 佐藤隆夫, 西田真也: 短時間提示下における二次の両眼立体視. *Vision*, 5, 167, 1993.
- 13) H. Ono and M. J. Steinbach: Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception and Psychophysics*, 48, 179-187, 1990.
- 14) H. Ono and H. Ujike: Zone in which motion parallax is completely effective. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 34, 1052, 1993.
- 15) H. Ono and H. Ujike: Equal depth contours as a function of direct velocities of head movement. *Perception*, 22, 81, 1993.
- 16) H. Ujike and H. Ono: Parallax depth threshold with different amplitudes and frequencies of head movement. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 33, 1374, 1992.
- 17) M. Ichikawa and H. Ono: Depth threshold and relative motion threshold with different common motion velocity. *Perception*, 25, 121, 1996.
- 18) M. Ichikawa and H. Ono: Depth perception from motion parallax and different viewing times. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38, 76, 1997.
- 19) V. Cornilleau-Pérès and J. Droulez: The visual perception of three-dimensional shape from self-motion and object motion. *Vision Research*, 34, 2331-2336, 1994.
- 20) V. Cornilleau-Pérès and J. Droulez: Visual perception of the curvature of real object from self-motion and object motion. *Perception*, 25, 93, 1996.
- 21) 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.
- 22) M. Ichikawa and S. Saida: How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception? *Perception and Psychophysics*, 58, 271-282, 1996.
- 23) B. J. Rogers and T. S. Collett: The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41, 697-717, 1989.
- 24) H. Ono, B. J. Rogers, M. Ohmi and M. E. Ono: Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, 17, 255-266, 1988.
- 25) M. Nawrot and T. Blake: The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception and Psychophysics*, 49, 230-244, 1991.
- 26) 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.
- 27) V. Cornilleau-Pérès and J. Droulez: Stereo motion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure. *Perception and Psychophysics*, 54, 223-239, 1993.
- 28) M. Ichikawa and S. Saida: Interaction of binocular and motion disparity depth cues at near threshold level. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 36, 667, 1995.
- 29) H. Ono, S. Shioiri and T. Sato: Monocular stereopsis after motion adaptation. *Perception*, 19, 363, 1990.