

自己運動の方向の知覚

近江 政雄

金沢工業大学 人間情報システム研究所

〒924 石川県松任市八束穂3-1

1. はじめに

我々が環境の中を自由に動き回ることができるのは、常に自らの身体が向かっている方向、すなわち自己運動の方向 (heading) を知っているからである。自己運動の方向に障害物があれば、衝突を避けるためにその方向を変える。ドアを通り抜けたり、定められた経路に沿って進むためには、それらに自己運動の方向を一致させる。自己運動の方向を変えるために身体をどのように動かせばよいかを学習することによって、我々は安全に歩いたり、走ったりすることができるようになるし、また、自転車・自動車・飛行機などを操縦することができるようになる。

自己運動の方向の知覚は、環境の中での自己定位、すなわち環境を構成する対象物と自己との空間的関係の認識と、近い将来におけるその関係の予測にかかわるから、環境の空間認識のためのメカニズムである視覚系の果たす役割が大きい。そのため、これまで主に視覚的情報を使って自己運動の方向を知覚するメカニズムについての研究が行われてきた。しかしながら自己運動の知覚は、そもそも視覚系のみによって生じられるものではなく、耳前庭感覚系や身体運動感覚系などとの統合の結果として生じられるものであり、それらの自己受容感覚系の自己運動の方向の知覚への寄与を無視することはできない。ここでは、まず視覚系による自己運動の方向の知覚のメカニズムに関するこれまでの主要な研究成果について解説し、次いで自己運動の方向の知覚における自己受容感覚系と視覚系の相互作用について我々の最近の実験結果

について簡単に述べることにする。

2. 視覚系による自己直進運動の方向の知覚

視覚系による自己運動の方向の知覚のメカニズムに関して理論的検討を加えたのはGibsonである¹⁾。Gibsonは自己直進運動 (translation) によって生じられる視覚刺激が、自己直進運動の方向に位置する拡大中心 (focus of expansion) から放射方向に拡がっていく速度場、すなわちオプティカルフロー (optical flow) となることを示した。したがって図1に示すように、自己直進運動の方向はオプティカルフローの原点である拡大中心によって表わされることになる。自己直進運動の方向の変化に応じて拡大中心と環境を構成する対象物との空間的關係が変化するから、「拡大中心を障害物の外・開口部の内に保つことによって我々は環境の中を自由に動き回ることができる」とGibsonは主張した²⁾。

オプティカルフローによる自己直進運動の方向についての情報には二つの重要な特徴があ

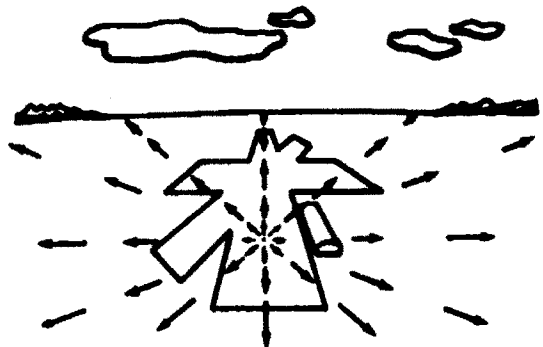


図1 自己直進運動によるオプティカルフロー (Gibson¹⁾より)

る。まず第一に自己直進運動の方向は局所的な (local) 拡大中心によってではなく、全体的 (global) なオプティカルフローによって決定されることである。Gibson はたとえ拡大中心が見えない場合にでも、自己直進運動の方向についての情報はオプティカルフローのいたるところに含まれていることを強調している¹⁾。第二にオプティカルフローを構成するドットの数ベクトルの大きさは環境を構成する対象物への距離に依存するが、速度ベクトルの方向は自己直進運動の方向によって決定されることである。したがって、オプティカルフローは対象物の距離や形状とは独立に自己直進運動の方向に関する情報、すなわち外界座標系に基づく情報を我々に与える。

Gibson による興味深い理論的検討にもかかわらず、その考えは必ずしも受け入れられず、オプティカルフローからの自己直進運動の方向の知覚に関する実験的研究は、その後あまり活発に行なわれてこなかった。しかも安全な自己直進運動のためには方向の判定に関して1度という精度が必要とされるにもかかわらず、それらの実験結果によれば、精度が5度～10度であることが示されてきた。これが、オプティカルフローによって自己直進運動の方向が知覚されるという Gibson の仮説に対して多くの研究者が疑いを持つに至った理由の一つであった。しかしながら近年になって、Warren とその共同研究者は、従来の実験的研究においては被験者に知覚される自己直進運動の方向を同定する作業 (identification task) を課していたことに問題があったと指摘し、その代わりに知覚される自己直進運動の方向を弁別する作業 (discrimination task) を課して一連の定量的な実験を行なった³⁻⁷⁾。

彼らは (a) 水平面に平行に自己直進運動をする場合、(b) 垂直面に向かって自己直進運動をする場合、(c) 立体の中を自己直進運動をする場合の3通りの運動に対応する視覚刺激を提示して自己直進運動の方向弁別精度を測定した。いずれの刺激についても、知覚される自

己直進運動の方向弁別精度が1度以下であり、従来の精度の低い実験結果は測定方法が不適切であったために起こったことが示された³⁾。また、自己直進運動の速度が方向弁別精度に影響せず、オプティカルフローを構成するドットの個数を10個にまで減らしても方向弁別精度が低下しないことを明らかにした。これらの実験結果は、Gibson が提唱した全体的なオプティカルフローによって自己直進運動の方向が知覚されるという仮説を支持する。

Warren et al⁶⁾ はさらに、オプティカルフローを構成するドットの持続時間を制限した瞬間速度場を提示しても、自己直進運動の方向弁別精度は低下しないことを示した。また、それぞれのドットについて運動方向に関する情報を保持して運動の速さをランダムに変化させた場合には自己直進運動の方向弁別精度は低下しないが、それぞれのドットについて運動の速さに関する情報を保持して運動方向をランダムに変化させた場合には自己直進運動の方向の弁別ができなくなることを明らかにした。Warren and Kurtz⁷⁾ は、拡大中心の提示位置を中心窩から離れていくと、自己直進運動の方向弁別精度が徐々に低下していくことを示した。この結果は、自己直進運動の知覚される大きさや体勢への影響の場合と同様に、自己直進運動の方向知覚に関しても網膜周辺部より網膜中心部の寄与が大きいことを示すものであり、先の結果とあわせて全体的なオプティカルフローによって自己直進運動の方向が知覚されるという仮説を更に支持する。

視覚系における運動情報は、一次視覚野 (V1)、内側側頭野 (MT: medial temporal area)、内側上部側頭野 (MST: medial superior temporal area) で処理されると考えられている。受容野の大きさが V1 から MT, MST へと進むにつれて増加することから、全体的なオプティカルフローの処理は MST で行なわれると考えられており、実際に MST において拡大するオプティカルフローに特異的に応答する神経細胞が発見されている^{8, 9)}。これは、Gibson によ

る仮説に神経生理学的基礎を与えると考えられる。

3. 自己直進運動の方向の知覚に対する眼球運動の影響

自動車運転教習員が教示するように我々が進んで行く方向を常に見続けければ、オプティカルフローの拡大中心を固視することになって、固視点・オプティカルフローの拡大中心・自己運動の三者の方向が一致し、極めて安全に運動することができる。しかしながら現実の環境には、我々とも環境とも独立に運動する対象物が様々の空間位置に存在し、それらを認識するためには眼球運動を行なって対象物を中心視しなければならない。自己直進運動が拡大するオプティカルフローを生起するのに対して、眼球運動は並進するオプティカルフローを生起する。したがって水平面に平行に自己直進運動をしながら追従眼球運動をすれば、図2に示すようなオプティカルフローが生起される。自己運動の方向に存在していた拡大中心が消滅し、固視点のところに渦巻き状の新しい拡大中心が生じている。垂直面に向かう自己直進運動の場合に

は、固視点の周りに生じる拡大中心は放射状のものになってしまう。したがって単純に拡大中心を使っては自己運動の方向を知覚できないことになり、この「眼球運動問題」がGibsonが提唱した仮説に疑いが持たれた第二の理由である。

我々の視覚系が「眼球運動問題」をいかにして解決しているかについて、様々の仮説が提唱されている。その一つとして追従眼球運動に伴うエファレンスコピーのような信号を利用して、眼球運動による並進オプティカルフローを打ち消しているという説がある。Warren and Hannon^{4, 5)}は自己直進運動に対応する拡大オプティカルフローの提示中に、追従眼球運動をさせるか並進オプティカルフローを加えた場合に、知覚される自己運動の方向弁別精度を測定した。追従眼球運動をさせた場合には、すべての視覚刺激に対して拡大中心を固視した場合と同様の弁別精度がえられた。これに対して並進オプティカルフローを加えた場合には、垂直面に向かって自己直進運動をしたときに方向弁別が不可能になったのを除いては正常な弁別精度がえられた。この結果は奥行きに関する情報が



図2 水平面に平行に自己直進運動をしながら追従眼球運動をした場合のオプティカルフロー (Warren and Hannon⁴⁾ より)

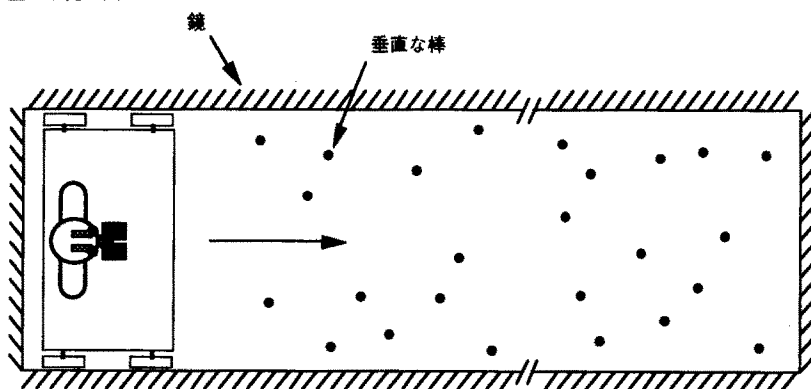
与えられている場合には、眼球運動信号を利用することなく視覚情報のみを用いて「眼球運動問題」が解決されうること示唆する。

これに対して Royden et al¹⁰⁾ は並進オブティカルフローの速度を Warren and Hannon^{4, 5)} の場合よりも増加したときに、水平面に平行な自己直進運動についても方向弁別精度が著しく低下し、曲線路に沿った自己曲進運動が知覚されることを示した。また van den Berg¹¹⁾ は拡大オブティカルフローに方向ノイズを加えた視覚刺激を提示し、追従眼球運動をさせた場合の方が並進オブティカルフローを加えた場合に比べてノイズに対する耐性が増加することを示した。これらの結果は、自己運動の方向の知覚における眼球運動信号の必要性を示すものであるとともに、視覚刺激が似通ったものになる自己曲進運動と追従眼球運動を伴う自己直線運動を区別

するメカニズムに対する示唆を与えるものとして興味がある。

Rieger and Lawton¹²⁾ は、環境の中で奥行きが不連続に変化するところでは拡大オブティカルフローは不連続になるが、並進オブティカルフローは連続することを利用すれば「眼球運動問題」が解決されることを示した。彼らのモデルは簡単な初期運動情報のみを使い、しかも対象物の境界をも同時に分離できるという魅力がある。しかしながら、環境の中に動く対象物がある場合やオブティカルフローの構成要素が少ない場合に対応できないという欠点があり、Hildreth¹³⁾ によって改良版が提唱されている。また、このモデルは奥行きに関する情報が与えられている場合には、視覚情報のみを用いて「眼球運動問題」が解決されるという Warren and Hannon^{4, 5)} の実験結果と良く対応してい

上から見た図



横から見た図

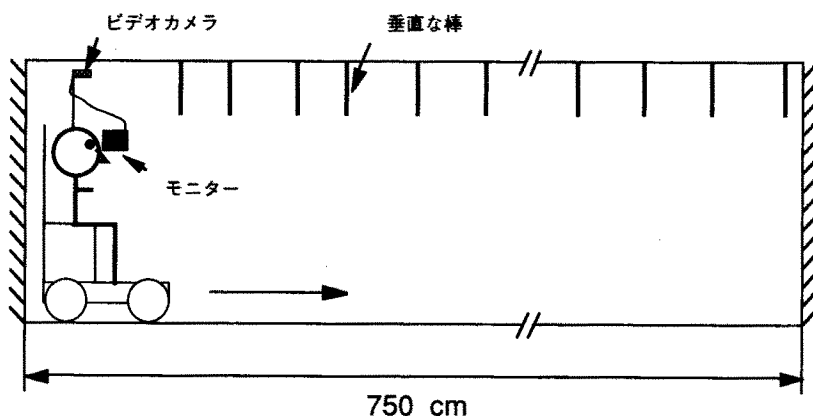


図3 自己直線運動の方向の知覚に対する三つの感覚系の相互作用を検討するための実験装置

る。

「眼球運動問題」を解決するために、我々の視覚系は単一の情報を使用しているのではなく、むしろ多種多様な情報を利用し、それらを統合しているように思える。Gibsonの仮説が提唱されて半世紀、ようやく最近になってディスプレイ装置の急激な発達に伴ってか、本格的な実験的研究が始められた。視覚系において様々な情報がどのように統合されて自己運動の方向知覚がもたらされているかに興味を持たれているわけであるが、情報の統合は視覚系内部だけで起こるものではない。自己運動の知覚は、視覚系・耳前庭感覚系・身体運動感覚系などからの情報の統合の結果として生じられるものであり、自己受容感覚系の自己運動の方向の知覚への寄与を無視することはできない。そこで自己運動の方向の知覚における自己受容感覚系と視覚系の相互作用について最近実験を行なったので、その結果について簡単に触れる。

4. 自己運動の方向の知覚における自己受容感覚系と視覚系の相互作用

自己受容感覚系と視覚系の相互作用について検討するために、図3に示すような装置を製作した。被験者は椅子に座って直線運動するかまたは、腰のまわりの輪に引かれて歩く。前者では耳前庭感覚系が、後者では身体運動感覚系が刺激され、それぞれの感覚系による自己直進運

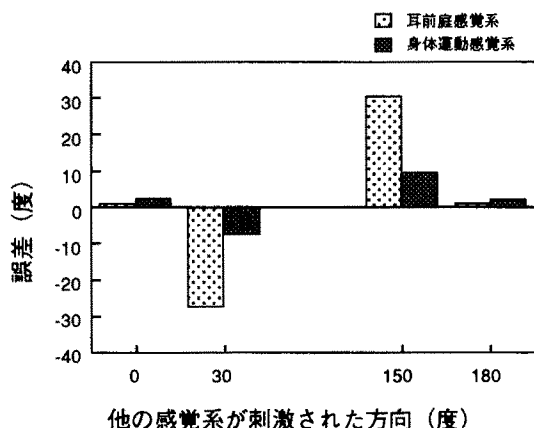


図4 視覚系と自己受容感覚系への刺激の方向が異なる場合の知覚される運動方向の誤差

動の方向が知覚される。視覚刺激はヘッドマウンテッドディスプレイによって与えられ、被験者の進行に対応して垂直棒の拡大オプティカルフローが呈示される。被験者の運動のさせ方と合わせて、視覚系と耳前庭感覚系、視覚系と身体運動感覚系という組み合わせを実現できる。

正面方向への自己直進運動に関しては、それぞれの感覚系による運動方向の知覚の精度は5度以下であり、いずれの感覚系によっても自己運動の方向を正しく知覚出来ることがわかった。自己受容感覚系と視覚系が異なった方向に刺激された場合の知覚される自己運動の方向を図4に示す。自己受容感覚系と視覚系が逆方向に刺激された場合には、自己受容感覚系が刺激された方向への自己運動が知覚され、自己受容感覚系が完全な優位にたつことがわかった。これに対して自己受容感覚系と視覚系が似た方向に刺激された場合には、耳前庭感覚系と身体運動感覚系では異なった傾向が示された。視覚系と耳前庭感覚系の組み合わせでは視覚系によって知覚される運動方向が知覚され、視覚系と身体運動感覚系の組み合わせではそれぞれの感覚系によって知覚される運動方向の中間の方向が知覚された。自己直進運動の方向の知覚における様々な感覚系の相互作用は、感覚系の組み合わせのみならず運動方向によっても変化し、必ずしも単純なものではないことが判明した。

5. おわりに

我々の自己運動の方向の知覚に関して、視覚系による方向の知覚のメカニズムについて述べ、さらに自己直進運動の方向の知覚における自己受容感覚系と視覚系の相互作用について述べた。

文献

- 1) J. J. Gibson: The perception of the visual field. Boston, Houghton Mifflin, 1950.
- 2) J. J. Gibson: The ecological approach to visual perception. Boston, Houghton Mifflin, 1979.
- 3) W. H. Warren, M. W. Morris and M. L. Kalish: Perception of translational heading from optical flow.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 646-660, 1988.
- 4) W. H. Warren and D. J. Hannon: Direction of self-motion is perceived from optical flow. *Nature*, 336, 162-163, 1988.
 - 5) W. H. Warren and D. J. Hannon: Eye movements and optical flow. *Journal of the Optical Society of America A*, 7, 160-169, 1990.
 - 6) W. H. Warren, A. W. Blackwell, K. J. Kurtz, N. G. Hatsopoulos and M. L. Kalish: On the sufficiency of the velocity field for perception of heading. *Biological Cybernetics*, 65, 311-320, 1991.
 - 7) W. H. Warren and K. J. Kurtz: The role of central and peripheral vision in perceiving the direction of self-motion. *Perception and Psychophysics*, 51, 443-454, 1992.
 - 8) K. Tanaka and H. Saito: Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of the medial superior temporal area of the Macaque monkey. *Journal of neurophysiology*, 62, 626-641, 1989.
 - 9) G. A. Orban, L. Lagae, A. Verri, S. Raiguel, D. Xiao, H. Maes and V. Torre: First-order analysis of optical flow in monkey brain. *Proceedings of the National Academy of Science, U. S. A.*, 89, 2595-2599, 1992.
 - 10) C. S. Royden, M. S. Banks and J. A. Crowell: The perception of heading during eye movements. *Nature*, 360, 583-585, 1992.
 - 11) A. V. van den Berg: Robustness of perception of heading from optic flow. *Vision Research*, 32, 1285-1296, 1992.
 - 12) J. H. Rieger and D. T. Lawton: Processing differential image motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 354-359, 1985.
 - 13) E. C. Hildreth: Recovering heading for visually-guided navigation. *Vision Research*, 32, 1177-1192, 1992.