

進行方向知覚と自己運動知覚の分離と統合

Separation and integration of heading and self-motion perception

研究代表者 豊橋技術科学大学知識情報工学系 助教授 北崎 充晃
Department of Knowledge-based Information Engineering, Toyohashi University of Technology
Associate Professor Michiteru KITAZAKI

人間の視覚機能は、外界にある対象の形や色、そして位置や運動を同定するのみではない。自己身体の運動や傾きを知覚し、進行方向を判断し、姿勢を制御すること等がもう一つの重要な機能である。この視覚情報からの自己運動情報の抽出に関しては、これまで自己運動知覚、身体動揺、進行方向知覚などが個別に研究されてきた。本研究は、これら諸機能の分離と統合を明らかにすることを目的とし、同一の視覚刺激を用いて進行方向知覚と自己運動知覚・身体動揺を同時に測定することによってこれらを正しく比較検討し、さらに一方に有効な手がかりと他方に有効な手がかりをコンフリクト(矛盾)させることで、分離と統合を定量的に検討した。

Human observers perceive self-motion, control their posture, judge and steer their heading direction by utilizing optical-flow information. The purpose of this study is to investigate the integration of these optical-flow based self-motion processings. Psychological experiments were conducted and results suggested that the processing of visual control of posture uses earlier visual information such as summation of motion components than the processing of vection, heading and steering, which use output of opponent-motion processing.

1. 研究目的

一般に、自己運動にともない生じる網膜上運動をオプティカル・フロー (Optical Flow) という。但し、広義には網膜上の運動情報を全てオプティカル・フローと呼ぶこともある。いずれにせよ、私たちの網膜には、外界の対象物体が運動しているときも、自己身体が移動しているときも運動速度場が生じる。また、対象物体や環境の奥行き構造に応じて、相対運動からなる速度場が生じる。実際、この世界において、我々は移動する観察者であるし、外界の物体は人であれ草木のような無生物であれ、それ自身移動する可能性がある。また、全ての物体は奥行きをもって私たちの周りに存在している。したがって、オプティカル・フローには、対象運動、自己運動、そして対象構造 (奥行き) の全てが非選択的に投影されている。そして、視覚の処理は、このオプティカル・フローを入力として、逆問題を解くように対象運動、自己運動、そして対象構造を分解・復元する過程であると考えられる。したがって、人間の視覚処理系の主要な目的は、外界にある対象物体の構造や運動を認識することのみではなく、外環境における観察者自身の位置・方位、運動を認識すること、および視覚情報をもとに対象に手を伸ばしたり、姿勢や進行方向を制御するなど行動制御への適用にもあるといえよう。

特に本研究では、このようなオプティカルフローからの視覚知覚に関して、自己運動情報の抽出と行動への利用について統合的に解明することを目的としている。本論文では、自己運動感覚 (vection)、視覚性姿勢制御 (visual

control of posture)、進行方向知覚 (heading)、そして能動的進行方向操作 (steering) について、それぞれの処理機構の共通性と分化を心理実験によって検討した。

2. 研究経過

2.1 非注意要素による自己運動感覚

列車に乗車して発車を待っているとき、隣のレーンの電車が動き出すと、避けがたいリアルな自己運動 (自分の乗っている電車が動いている感覚) を感じることがある。これは、網膜上の運動が、実世界においては対象物体の運動 (隣のレーンの電車の運動) によって生じたにもかかわらず、観察者自身の運動として知覚されることによって生じる。実空間から網膜像に投影する過程においては、自分の乗っている電車が動き出した場合も、隣の電車が動き出した場合も、同様の網膜運動を生じる。それゆえ、視覚知覚処理においては、網膜運動成分が対象運動によって生じたのか、あるいは自己運動によって生じたのかを一意に決定することは不可能である。特に静止中や定速運動中では、加速度のみを検出する前庭系は自己運動情報を確定できない。したがって、ここに対象運動と自己運動の間の曖昧性解決の問題がある。そこで、視覚知覚処理系は、なにかを静止している環境と反定し、それが静止しているように自己運動を知覚すると考えられている。これまでの視覚性自己運動の研究から、自己運動感覚 (vection) は、小領域より大領域、中心視野より周辺視野、また手前より奥の運動成分と反対方向に生じることが示されている。つまり、大領域、周辺視野、

および奥の成分が、外界において静止した対象として仮定されており、そのなかで観察者自身が運動していると知覚されることを示している。それゆえ、自己運動方向は、それらの網膜上の運動と逆方向になる。一方、小領域、中心視野、および手前の成分は、それ自身が運動している対象と知覚されるので、自己運動にはほとんど影響を与えない。つまり、人間の視知覚処理系は、大領域、周辺視野、および奥の成分を、外界において静止した対象として仮定する。

筆者等は、これら自己運動感覚を決定していると知られている領域サイズ、偏心度、奥行きの物理的要因を統制した相反運動刺激を用いて、内的要因としての自発的注意の影響を調べた(図1)。

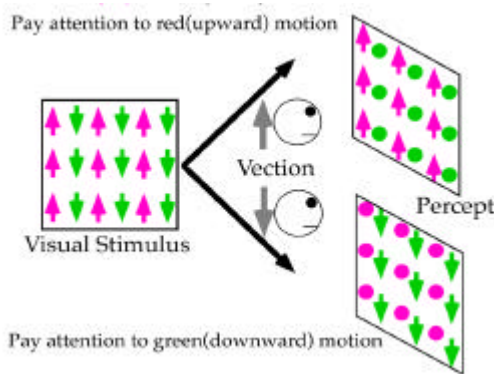


Figure 1. Attentional modulation of vection

その結果、相反する運動方向成分が含まれている広視野ディスプレイが提示されているとき、注意を向けた運動成分と同じ方向の自己運動感覚が知覚された。これは、自己運動知覚が注意を向けなかった運動成分と反対方向であることを意味し、非注意成分が自己運動感覚を決定する新しい要因であることを示した[11]。ただし、相反運動刺激の間に奥行きの違いが存在する場合には奥行きの効果の方が優性であり、注意の効果は刺激の物理的属性が曖昧な場合に付加的に作用すると考えられる。そこで筆者等は、非注意成分は大きな領域や背景と同様に知覚的な地(ground)として体制化されやすく、図が形や対象の運動として知覚される一方、地は静止した環境として解釈され自己運動感覚を誘導する」とい物理的要因・内的要因を包括する説を提案した。

2.2. 注意追跡運動による重心動揺

目を閉じるとまっすぐ歩くことも難しいことから、視覚情報が姿勢制御に利用されていること(visual control of posture)は明らかである。実際、正立状態であっても、開眼時の身体動揺は閉眼時の50? 60%程度に減少し、特に1.2Hz以下の身体動揺が顕著に減少することが示されている。これは、視覚情報が姿勢の安定化に利用されていることを示している。また、視野に運動を提示することで身体動揺が誘導されることも報告されている。なお、自己運動

感覚との比較において、視覚性身体動揺の潜時の方が短いとされている。したがって、視覚性身体動揺の方が自己運動感覚より感度が高く、より低次・初期の視覚情報処理に依存しているのではないかと考えられている。

前述のように筆者等の研究では刺激の物理特性が曖昧なとき自己運動感覚は相反運動刺激の非注意成分により決定された。しかし、同様の視覚刺激を用いて重心動揺を測定すると、必ずしも非注意成分のみによる重心動揺のみが観察されるわけではなかった。したがって、自己運動感覚と視覚性重心動揺(視覚性姿勢制御)は、同一の処理機構に依拠しているわけではないことが示唆された。そこで、視覚性重心動揺における注意の効果について、相反運動刺激ではなく曖昧運動刺激を用いて検討した。

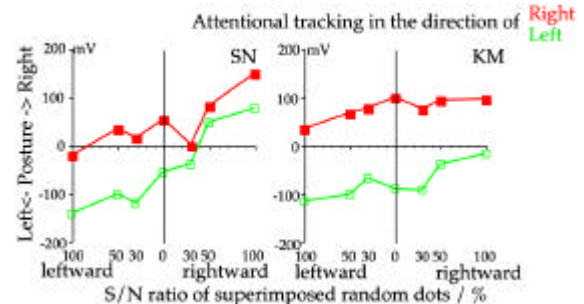


Figure 2. Postural sway from attentional-tracking motion and first-order motion.

正弦波状の輝度グレーティングを時間的に位相反転提示すると、運動方向は曖昧になる。これを注意によって追跡(トラッキング)することにより一方向の運動を知覚することが可能である。ただし、この注意追跡からの運動知覚は運動印象が弱く、それによって自己運動感覚が生じるかどうかを調べるのは難しい。この位相反転刺激を広視野ディスプレイに提示し、被験者に任意の運動方向に注意追跡するように教示すると、知覚された注意追跡運動と同方向の重心動揺が観察された。この注意運動からの重心動揺は、グレーティングの輝度コントラストに依存することから、単なる注意や認知的期待による誘導ではなく、知覚された運動成分からの誘導であることが示唆された。また、位相反転グレーティングにランダムドットのSN比を操作した一次運動(輝度により定義される非曖昧運動)を重畳提示すると、注意追跡運動の効果と一次運動の効果が共に加算・平均された重心動揺が観察された(図2)。したがって、視覚性姿勢制御は、一次運動と注意追跡運動の双方の情報を利用しているか、その総体としての知覚された運動情報を利用していることが示唆された。

2.3. 重畳運動からの進行方向知覚と進行方向操作

人間は、非常に少ない視覚情報(まばらな少数の点の運動や不連続な運動情報)から正確な自己進行方向(heading)を知覚可能である心理物理実験においては、ランダム・ドットを三次元空間内に雲状や板状に配置したもの

に対して視点移動をシミュレートした放射状運動を提示し、被験者は進行方向をポインティングで判断したり、提示されたプローブに対して進行方向がより左か右かの二件法で回答する。このように測定された進行方向判断は、ノイズに対する耐性も高いが、速度に対するノイズより方向に関するノイズによる精度低下が顕著である。本研究では、ノイズではなく整合的な平行運動を放射状運動に重畳したものを刺激として用い、自己進行方向知覚 (heading) および能動的進行方向操作 (steering) を調べた。これは、独立対象運動がある場合の進行方向知覚実験のパラダイムを踏襲した刺激である。

もし放射拡大運動と平行運動が平均・加算されたオプティカル・フローが知覚に利用されるなら、進行方向を示す拡大焦点 (FOE; Focus Of Expansion) は平行運動と反対方向にずれるはずである。しかし、実験の結果、進行方向は重畳された平行運動と同じ方向にずれて知覚された。また、ステアリング・ホイールを用いた能動的な進行方向操作においても同様の傾向が見られた。このことは、進行方向知覚およびその能動的操作を担う処理が、重畳された運動の平均・加算のオプティカル・フローを利用しているのではなく、相反運動処理に基づく処理の出力を利用している可能性を示唆する。さらに、筆者等は、両眼立体視による奥行き分離によって並進運動の効果が減少すること、並進運動領域の輪郭と内部要素の運動を矛盾させた場合でも輪郭の運動に基づく進行方向への影響があることを示した (図3)。

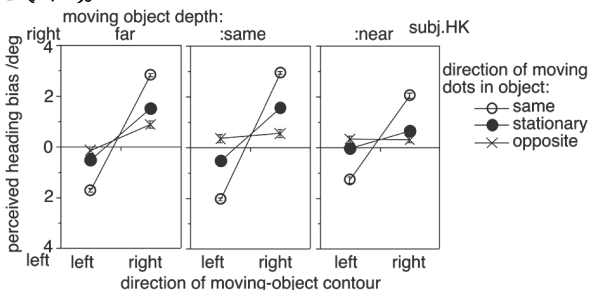


Figure 3. Heading bias induced by global contour motion

これらのことから、進行方向の知覚と操作は、相反運動処理、奥行き分離、そしてグローバル運動などのやや高次の運動処理の出力結果を利用していると考えられる。

2.4. 重畳運動からの重心動揺

前章で用いたものと同様の放射運動と平行運動の重畳刺激を用いて視覚性重心動揺を測定し、進行方向知覚と比較検討することで処理機構の違いを考察した。その結果、観察者の重心は、重畳された進行方向と同じ方向に傾いた。これは、知覚された進行方向からの予測と矛盾するものであり、むしろ重畳された運動の平均・加算から予測される結果であった (図4)。



Figure 4. Heading and posture from combined optical flow

したがって、視覚性姿勢制御は、2つの運動成分が重畳されたとき、その単純な加算・平均の出力を利用するか、あるいはそれぞれの運動成分を同時並列に利用している可能性が示唆された。

3. 研究成果

自己運動感覚 (vection) が自発的注意による図地の体制化の影響を受けること、非注意運動成分により誘導されることを示した。一方、視覚性姿勢制御 (visual control of posture) は、むしろ注意によって生じる運動知覚そのものから生じること示した。放射運動と平行運動を重畳した視覚刺激を用いて進行方向知覚 (heading) と進行方向操作 (steering) を調べた結果、運動成分の平均・加算ではなくより高次の相反運動処理の結果に基づいて処理が行われていることが示唆された。一方、視覚性姿勢制御に関しては、同一の刺激を用いたにも関わらず、運動成分の平均・加算をそのまま利用している可能性が示唆された。

これらの結果から視覚性姿勢制御の処理が、他の自己運動情報処理より低次であり、比較的初期の視覚情報を用いて行われているのではないかとと思われる。ただし、運動処理の中では高次とされる注意追跡運動の影響を受けることから、高次視覚領野からの (おそらくフィードバックによる) 影響もあると考えられる。一方、進行方向知覚およびその能動的操作は、より高次の視覚領野の処理を入力していることが示唆された。

4. 今後の課題と発展

進行方向操作としては現在はステアリング・ホイールを用いており、一般的な人間行動としては妥当性が低いと考えている。そこで現在、より自然な知覚・行動処理として、歩行経路を指標とした実験を計画している。

本研究では、オプティカル・フローからの自己運動知覚としてひとくくりになされがちさまざまな処理について、その処理水準を比較検討することを目的とした。その結果、おおまかであるが各処理の水準の違いを示すことができた。これま

で、意識的で対象認識を主とする知覚経路 (what系) と無意識的で行動利用を主とする知覚経路 (where系) の存在が報告されている。オプティカル・フローからの自己運動情報処理は、必ずしもこの枠組みのなかのwhere系のみには収まるものではないと筆者は考えている。むしろ、自己運動情報処理の統合過程の解明はwhatとwhereの2つの系のつながりを明らかにしてくれるのではないかと。そして、自己運動情報の処理のどの部分が共通であり、独立した別のモジュールなのか、どのような処理経路を経て相互作用しているのかを統合的に調べていくことが必要だろう。それによって、バーチャル・リアリティ技術におけるより適切な自己運動情報の提示が可能となる。

また、工学的応用としては自動車運転場面における安全性の向上、高齢ドライバーの運転補助機能の開発を目指している。

5. 発表論文リスト

5.1 原著論文

Kitazaki, M. and Sato, T. (2003), Attentional modulation of self-motion perception, *Perception*, 32, 475-484.

茅原拓朗, 小木哲朗, 北崎充晃, 吉野知也, 廣瀬通孝 (2003), マルチメディア・バーチャル・ラボトリーによる遠隔知覚 認知心理学実験システム, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 8(1), 57-64.

黒瀬勲信, 北崎充晃 (2003), 放射状運動による視覚性身体動揺: 進行方向についての時空間感度, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 8(2), 189-198.

5.2 国際学会発表

Kitazaki, M. and Yoshino, T. (2002), Self-motion sensation in virtual reality improves spatial updating for mobile observer, VSS (Vision Sciences Society meeting), Sarasota, Florida, USA, May 2002. *Proceedings of Vision Sciences Society Meeting*, 2, 218-219., *Journal of Vision*, 2(7), 633a, <http://journalofvision.org/2/7/633/>

Kitazaki, M. and Kurose, I. (2002), Visual control of posture: effects of heading direction and object motion, Second Asian Conference on Vision, Gyeongju, Korea, July 2002. *Proceedings of Second Asian Conference on Vision*, 55-55.

Kitazaki, M. and Kurose, I. (2003), Postural sway from combined optical flow of radial and lateral motions, VSS (Vision Sciences Society meeting), Sarasota, Florida, USA, May 2003. *Proceedings of Vision Sciences Society Meeting*, 3, 155-155.

Kayahara, T., Kitazaki, M., Yoshino, T., Ogi, T. and Hirose, M. (2003), Effect of observer's self-motion sensation on scene recognition in immersive virtual-reality environment, ECVP (European Conference on Visual Perception), Paris, France, September 2003. *Perception*, 32 (Supplement), 68-68.

Kitazaki, M. and Goto, A. (2003), Steering control from optical flow of radial and lateral motions, ECVP (European Conference on Visual Perception), Paris, France, September 2003. *Perception*, 32 (Supplement), 73-73.

5.3 国内学会発表

北崎充晃・黒瀬勲信 (2002), 視覚性姿勢制御と進行方向知覚の分離, *日本バーチャルリアリティ学会*, 東京, 日本, September 2002, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, 7, 557-560,

2002.

黒瀬勲信・北崎充晃 (2002), 視覚性身体動揺の時空間特性, *日本バーチャルリアリティ学会*, 東京, 日本, September 2002, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, 7, 553-556, 2002.

北崎充晃 (2003), オプティカルフローの知覚心理学, *日本心理学会* 第66回大会, 東京, 日本, September 2003., *日本心理学会第66回大会発表論文集*, S25-S25.

北崎充晃, 後藤充慶 (2003), 放射運動と平行運動の重畳オプティカルフローからのステアリング操作, *日本バーチャルリアリティ学会*, 岐阜, 日本, September 2003, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, 8, 315-318, 2003.

黒瀬勲信, 間瀬和夫, 北崎充晃 (2003), 視覚性重心動揺における奥行きと注意の効果, *日本バーチャルリアリティ学会*, 岐阜, 日本, September 2003, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, 8, 319-322, 2003.