

自己運動方向の判断

花田 光彦

私たちは環境中を動いて生活している。円滑に行動するためには、環境がどうなっているのかを知り、自分自身が今どのように動いているのかを知覚し、行動を制御する必要がある。現在の私たちは、歩いたり、走ったりして動くだけでなく、自動車などで高速に移動しており、自己運動を知覚する能力が非常に重要であると考えられる。

自己運動を知るために、前庭器官によって検出された加速度情報や運動制御信号のエファレンスコピー、筋肉からのフィードバック情報などが使われていると考えられるが、視覚情報も自己運動の知覚には欠かせない。多くのフライトシミュレーターやドライビングゲームなどは視覚情報しか得られないが、それでも自己運動を知覚することができる。このことは視覚情報も自己運動知覚において重要な役割を担っていることを示している。

視覚情報による自己運動知覚の研究では、主にどこに向かって動いているのか（いたのか）を観察者がどの程度の正確さで知覚することができるのかについて検討されてきた。網膜上の運動速度から計算できるのは、自己回転運動と自己並進運動の方向であるため、計算理論的な限界と、ヒトの視覚情報処理との比較のために主に自己運動方向が問題となってきたためと考えられる。自己運動の仕方により、自己並進運動方向知覚の正確さがどの程度変わるかについて、まず述べる。

1. 視覚情報による自己運動知覚

自己運動は、回転運動と並進運動に分けることができる。回転の軸はどこにでもとることができるが、自己運動を扱う場合には、座標原点を眼球にとり、それを中心にし

て回転を表現するのが便利である。その場合、回転運動は鉛直軸回りの回転ヨー、水平軸回りの回転ピッチ、視線軸回りの回転ロールによって記述できる。並進運動は、前方、側方、鉛直方向の移動で表現でき、3次元空間内の向きと大きさを表される（図1）。

回転運動がなく、空間中を直線的に移動する場合、自己運動方向は、拡大焦点 (focus of expansion: FOE, 図2(a) 参照) に一致するが、眼球や首、体の回転運動があるときには、図2(b) のような回転成分が速度パターンに加わるため、自己並進運動方向は拡大焦点と一致しない（図3）。しかし、実際に観察者が眼球運動している場合には、自己並進運動方向を正確に知覚することができる^{1,2)}。これは、眼球運動のフィードバック信号やエファレンスコピーといった網膜外情報から、回転運動の成分を補償しているためであると通常考えられている。では、視覚運動だけから自己運動方向は正確に知覚されるのであろうか。

従来の研究では、自己並進運動に垂直方向の運動は含まれず、また、主に鉛直軸回りの回転ヨーだけがある状況での自己運動知覚について調べられてきた。これは、私たちが何かをみながら移動するときに対応する状況である。ヨーが小さい場合には、自己並進運動方向はかなり正確に視覚運動情報だけから知覚されることが知られている。Warren and Hannon は、ランダムドットで構成された画面を提示して、自己並進運動方向を判断させた¹⁾。条件としては、(a) 実際に動くドットを注視して眼球運動を観察者にしてもらった条件と、(b) 眼球運動はしないけれど、眼球運動をしているときをシミュレートした視覚刺激を用いた条件の2つであった。眼球運動の回転速度は1.5 deg/s以下とかなり小さかった。結果は、ドットの奥行きをランダムに配置したクラウド状の刺激や、地面のように配置したグラウンド刺激では、自己並進運動方向が(a), (b) 両条件

千葉大学文学部行動科学科認知情報科学講座 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)
E-mail: hanada@bun1.chiba-u.ac.jp

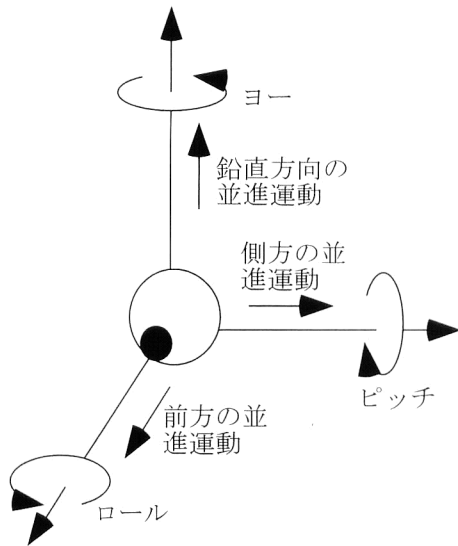


図1 自己回転運動と自己並進運動.

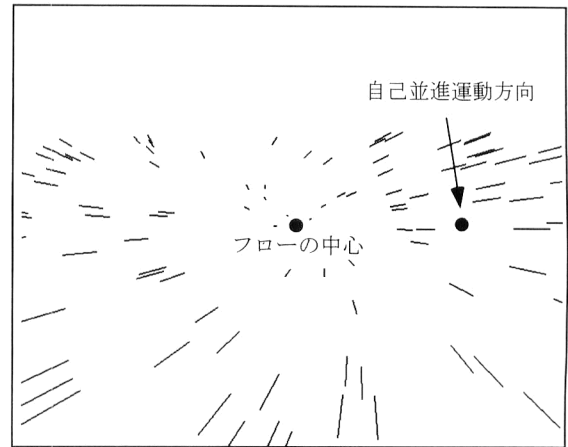


図3 グラウンド上の並進運動と回転運動がともにある場合の速度パターン. フローの中心と自己並進運動方向は回転運動成分があるために一致しない.

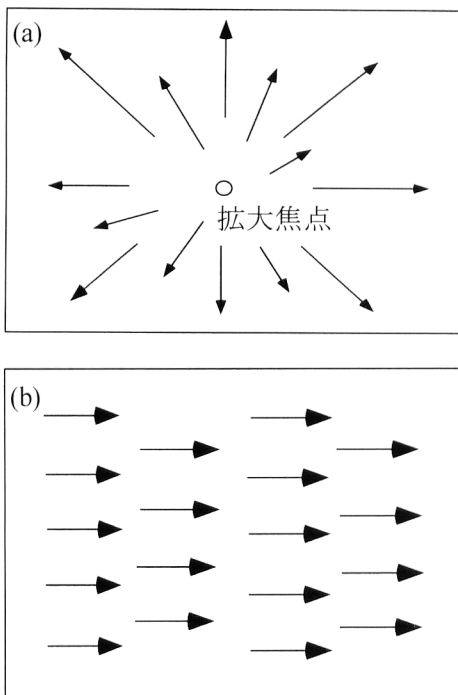


図2 (a)前方並進運動による網膜上の速度パターンと, (b)ヨー (鉛直軸回りの回転) による速度パターン.

で正確に知覚された。しかし、前額平行面をドットで構成した刺激では、眼球運動を実際にした条件 (a) では成績がよいが、眼球運動を実際にはせず、視覚刺激だけをシミュレートした条件 (b) では、自己並進運動方向は正確には知覚されず、注視点の方向に自己運動方向が知覚された。この結果は、回転運動速度が小さい場合、前額平行面以外の刺激では、自己運動方向は視覚運動情報だけから正確に知覚されることを示している。

回転運動ヨーが大きくなると、自己並進運動方向は正確

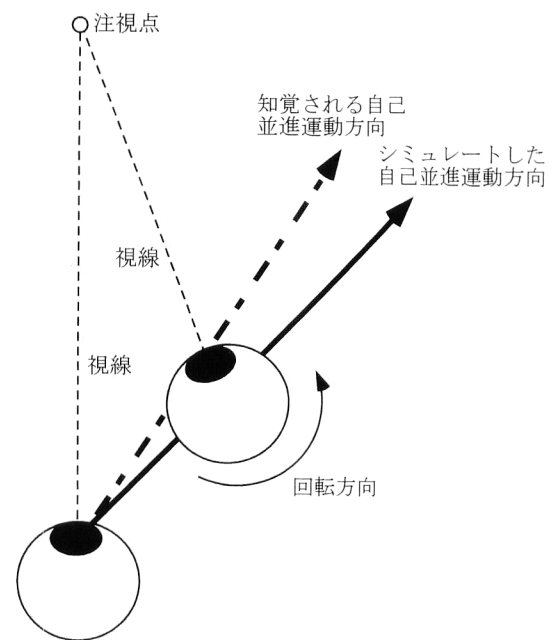


図4 シミュレートした自己運動方向と知覚される自己運動方向. 自己運動方向は、回転運動の方向に偏って知覚される。静止対象を注視している場合は、注視点の方向に偏る。

でなくなっていき、図4に示してあるように回転運動のほうに、知覚される自己並進運動方向が偏ってくる²⁾。対象を注視しながら、その対象とは別のところに向かって移動しているときには、注視点の方向に移動方向がずれて知覚される¹⁾。どれくらいのバイアスがあるのかについては研究ごとに違った報告がなされている。バイアスの大きさに影響する要因は以下のものが知られている。

- a) 奥行き範囲が狭いと回転方向へのバイアスが大きくなる³⁾。前額平行面条件はその極端な場合であり、最もバイアスが大きい場合と考えられる

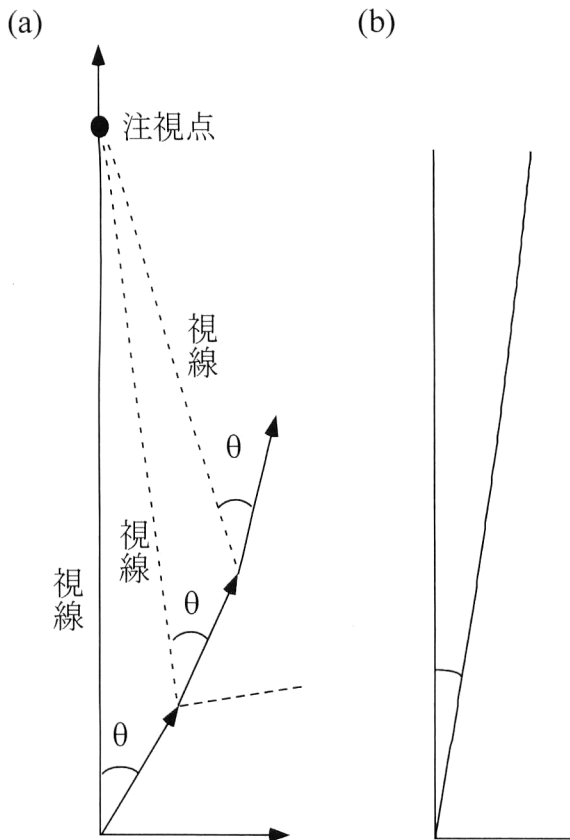


図5 (a) 実験に用いられた自己運動の軌道の模式図。観察者は、フレームごとに一定の角度で矢印に沿って移動する。(b) 実際に用いられた軌道の一例。

- b) 前方の並進運動が遅いとき、バイアスが大きくなる⁴⁾
 - c) 瞬間的な自己運動方向を判断させたときのほうが、かなり先の到達点を判断させたときより、バイアスが小さい⁵⁾。これは、直線自己運動をシミュレートしても、自己運動が曲がって知覚されるため、曲がった分を考慮した自己運動を予測するためのようである
- では、回転運動がヨーのみではなく、ピッチやロールもあるときには、どうなのだろうか。

2. 自己運動知覚へのピッチとロールの効果

ピッチとロールが自己並進運動方向判断に与える影響について調べた筆者らの研究結果を紹介する⁶⁾。

2.1 実験1：ピッチの効果

環境中の静止点を注視しながら移動するとき、水平面上を移動するときには回転運動はヨーのみが生じ、上方向の移動がないとピッチは生じない。上方向の自己運動は、地面上の移動のような横方向の自己運動ではほとんど生じないが、飛行機の操縦といったときには上方向にも移動が生じる。そのため、ヒトの知覚能力の限界を知ることは、理論的のみならず、実用的にも意義がある。そこで、環境中

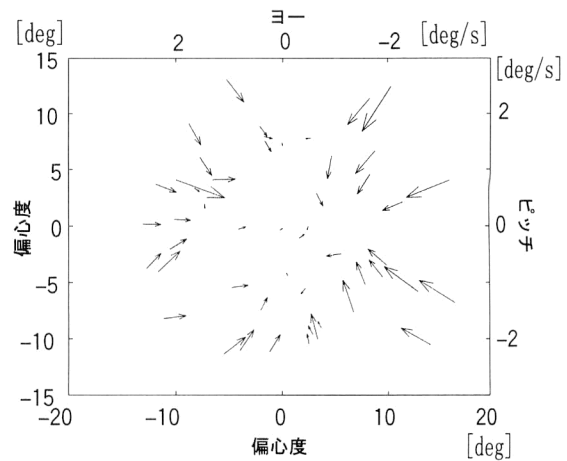


図6 ピッチとヨーがあるときの自己運動方向判断。矢印の付け根がシミュレートした自己運動方向であり、先端が判断された自己運動方向である。ロールはゼロである。前方の自己運動速度が試行ごとに異なり、また刺激提示中にも変化するため、自己運動方向の水平・垂直成分とヨー、ピッチは比例関係にはないが、おおよその目安として自己運動成分に対応する平均のヨー、ピッチをそれぞれ上と右に示す。

の静止点を注視しながら、水平方向だけではなく、上方向にも移動するときの自己運動方向知覚について検討した。

方法：4 m から 8 m の奥行き範囲に 100 個の白いドットを配置して、そこに向かって動いている状況をシミュレートする刺激を作成し、コンピューターディスプレイ上に提示した。観察者はどの方向に向かって移動していたかを刺激提示後にマウスを使って判断した。自己運動の軌道は、静止点を注視しながら視線に対して常に一定の方向に移動するという軌道を用いた (図5参照)。移動方向はディスプレイ上のある1点の方向であり、視線より上に移動するときにはピッチが生じる。この軌道を環境中に描くと平面上の曲線となる。もし、環境中において直線上を移動した場合、視線に対して自己並進運動方向が変化してしまい、判断すべき時点ではない自己並進運動方向を示してしまうかもしれない。しかし、この刺激ではどの時点でも視線に対して自己運動方向は一定なので、その心配がないと考えられる。シミュレートした自己並進運動速度は、前方並進速度成分が 0.75~1.25 m/s の範囲に、鉛直方向、および、横方向の自己運動速度成分 (前額平行面と平行な成分) が -0.25~0.25 m/s の範囲に、各試行についてランダムに決められた。ヨーおよびピッチの大きさは、ほとんどの試行で 5 deg/s 以下であり、それほど大きなものでなかった。

結果：図6に自己運動方向判断における典型的な結果を示す。中心が注視点の方向を示し、矢印の根のところが、各試行のシミュレートした自己並進運動方向であり、矢印の先端が知覚された自己並進運動方向を示している。縦軸の値がゼロ付近の試行では、ほぼ水平横方向の並進運動で

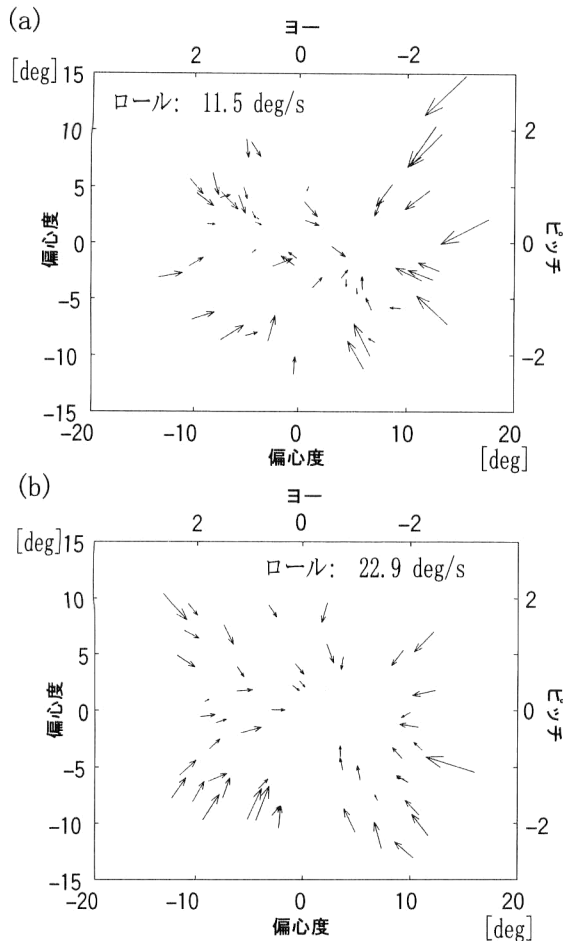


図7 ロールがあるときの自己運動方向判断. 矢印の付け根のところがシミュレートした自己運動方向であり, 先端が判断された自己運動方向である. (a)ロール: 11.5 deg/s, (b)ロール: 22.9 deg/s. 上と右の軸については, 図6の説明を参照のこと.

あり, シミュレートされたピッチは非常に小さく, 先行研究でよく用いられている条件である. このときには, 注視点のほうに自己並進運動方向判断が偏っている. 静止対象注視条件では, 回転運動の方向が注視点の方向にあたり, 先行研究の結果と一致した結果であるといえる. 中央の水平線から離れるにつれて, ピッチ成分が大きくなるが, 知覚された自己運動方向は, 全体的に注視点の方向に偏っていくという傾向はまったく同じである. よって, ヨーのみがあるとき, ヨーとピッチが両方あるときの自己運動方向知覚では, 定性的なバイアスの傾向や成績水準に違いがないことがわかった.

2.2 実験2: ロールの効果

日常生活において, 視線軸回りの回転, ロールが起こる状況は少ないが, 首をひねるように動かせばロールは生じる. また, 飛行機はロールしながら曲がる. よって, 自己運動においてロールがあることもあり, 自己運動方向判断におけるロールの影響を調べることは意義のあることと考

えられる. そこで, ロールが自己並進運動方向判断に与える影響について調べた.

方法: ロールしながら, 視線に対して常に一定の方向に並進運動を行う自己運動をシミュレートする刺激による自己並進運動方向判断を観察者にはしてもらった. ロールが加わる以外は, 実験1と同じである.

結果: 1人の観察者の自己運動方向判断の結果を図7に示す. 反時計回りの回転と時計回りの回転で大きな違いがみられなかったので, 時計回りの結果のみを載せている. (a)がロールの速さが, 11.5 deg/sのときの結果であり, (b)が22.9 deg/sの結果である. 自己運動知覚が注視点の方向に偏っていくという傾向は, ロールがないときと同じである. ロールが加わるにつれて, この知覚バイアスがやや大きくなる傾向がみられた.

2.3 実験1, 2の考察

ピッチの影響は, ほぼヨーの影響と同じであり, 注視点の方向, つまり, 眼球運動の方向へ, 若干の知覚バイアスが生じるが, かなり正確に自己並進運動方向が知覚されることがわかった. また, 普段あまり経験しない上方の自己運動が加わっても, バイアスが注視点の方向に生じるものの, 並進運動方向がかなり正確に知覚されており, 視覚情報による自己運動知覚が地上の移動に限定された状況のみに有効であるわけではないことが示された.

ロールがないときと20 deg/s以上のときで, あまり成績に違いがみられなかった. 実験1ではヨーおよびピッチが5 deg/s以下だったが, 知覚された自己並進運動方向にバイアスがみられたことや, 2 deg/sでも大きなバイアスがあるとする先行研究の結果²⁾を考えると, ロールの効果はヨーやピッチより小さいようである. ピッチがないときに, ロールの影響がヨーより小さいことは別の研究においても示されている⁷⁾.

3. 自己並進運動方向知覚のモデル

回転があるときの自己並進運動方向を計算するのは, それほどやさしくはない. ヒトの視覚システムはどのような方法を使って自己並進運動方向を計算しているのであろうか. 視覚像から自己回転があるときの自己運動を求めるアルゴリズムが多数提案されている. また, ヒトの視覚システムにおける自己運動知覚のモデルがいくつか提出されている. 以下, 有力な候補を簡単に紹介する.

3.1 運動差分アルゴリズム⁸⁻¹⁰⁾

回転運動の成分は狭い領域では一定である. よって, 奥行きが違う近傍の速度の差を計算すれば, それは並進運動成分になり, その拡大焦点を計算することにより, 自己並

進運動方向が計算可能である。MT (middle temporal area) には運動拮抗細胞という運動方向の差分に反応する細胞が報告されているが、その細胞を使って自己運動方向が計算でき、ヒトのデータを説明できることが示されている¹¹⁾。

3.2 運動テンプレート¹²⁻¹⁴⁾

運動速度テンプレートを作って、テンプレートに合う自己運動方向を知覚するというアルゴリズムがいくつか提案されている。この種類の方法では、テンプレートが多数必要なため、テンプレートを減らす方法が提案されてきた。Perrone and Stone は、静止対象を注視するということとロールがないということを見視システムが仮定しているとして、テンプレートを減らした¹⁵⁾。しかし、実験2の結果から、ロールがゼロという仮定をヒトの視覚システムが用いているわけではないということが示された。よって、ロールがあるときのテンプレートもヒトのデータの説明には必要である。Beintema and van den Berg は、並進運動のテンプレートを回転運動によるゲイン速度場によって補正して自己運動を推定しているのではないかと提案している¹³⁾。この方法ではテンプレートはそれほど多くは必要としない。Grossberg らは、限られたテンプレートにより自己並進運動方向を推定する別のテンプレート型アルゴリズムを提案している¹⁴⁾。

MST (medial superior temporal area) には、拡大、縮小、回旋運動といった運動パターンに反応する受容野の大きい細胞が報告されており^{16,17)}、自己運動知覚に対して重要な機能的役割を果たしているとされている¹⁸⁾。MST の特性は、モデルのテンプレートの特性とよく一致していることが示されている。

3.3 並列型最小二乗アルゴリズム¹⁹⁾

Lappe and Rauschecker は、ニューラルネットワークにより、Heeger and Jepson のアルゴリズム²⁰⁾ を使って自己運動方向を計算する方法を開発し、自己運動知覚のモデルとして提案している。彼らのモデルでも、MST の細胞の特性をかなりよく説明することができる。

3.4 差分運動視差 (differential motion parallax)²¹⁾

Cutting は、水平方向の自己並進運動だけに焦点をあて、多くの場合、自己並進運動方向は最も速く動く対象とは反対方向になることを示し²¹⁾、このヒューリスティックをヒトの視覚システムが用いていると提案している²²⁾。しかしながら、上方向の並進運動や大きなロールがあるときには、このヒューリスティックは有効ではなく、実験1, 2のようなデータを説明することはできない。ただし、私たちが通常生活している場合には、差分運動視差が用いられてい

る可能性は否定できない。

3.5 加算平均モデル²³⁾

Hanada and Ejima は、視野全体の各速度サンプルから期待値がロール、ピッチ、ヨーと一致する値を計算し、加算平均をとることにより自己回転を推定し、その推定値を用いて速度パターンから回転運動成分を除いてから、自己運動を計算するアルゴリズムを提案した。

筆者らのモデルでは、ここで紹介した実験のヨーやピッチによる並進運動方向の知覚バイアスなどが説明可能である。また、実験2のようなロールのある状況でも筆者らのモデルでは自己運動を推定することができ、データを説明できると思われるが、いくつかのモデルでは、実験2のロール、ピッチがあるときの自己運動知覚の結果を説明できない。現段階で得られるデータは、モデルが妥当であるかを決定するには不十分であり、どのモデルが妥当であるかを明らかにするためには、今後、さらなる心理物理学的、生理学的実験が必要であろう。

ピッチやロールがあるときでも、自己並進運動が視覚情報のみによって知覚される。ロールやピッチは、あまり自己運動中には起こらないが、ときには起こることがある。自己運動の知覚の失敗は重大な事故につながる可能性があるため、ヒトの視覚システムはロールやピッチがあるときにも、自己運動が知覚できるようになっているのではないだろうか。ただし、視動情報以外の網膜外情報がないときには回転運動を完全には補償できていないようであり、バイアスが生じるということに注意すべきだろう。

最後に、研究を指導してくださり、また本原稿を読んでいただいた京都大学江島義道教授に感謝いたします。

文 献

- 1) W. H. Warren and D. Hannon: "Eye movement and optical flow," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 160-169.
- 2) C. S. Royden, J. A. Crowell and M. S. Banks: "Estimating heading during eye movements," *Vision Res.*, **34** (1994) 3197-3214.
- 3) A. V. van den Berg and E. Brenner: "Human combine the optic flow with static depth cues for robust perception of heading," *Vision Res.*, **34** (1994) 2153-2167.
- 4) L. S. Stone and J. A. Perrone: "Human heading estimation during visually simulated curvilinear motion," *Vision Res.*, **37** (1997) 573-590.
- 5) A. V. van den Berg: "Judgement of heading," *Vision Res.*, **36** (1996) 2337-2350.
- 6) M. Hanada and Y. Ejima: "Effects of roll and pitch components in retinal flow on heading judgement," *Vision Res.*, **40** (2000) 1827-1838.
- 7) J. A. Beintema and A. V. van den Berg: "Perceived heading

- during simulated torsional eye movements," *Vision Res.*, **40** (2000) 549-566.
- 8) H. C. Longuet-Higgins and K. Prazdny: "The interpretation of moving retinal images," *Proc. R. Soc. London Ser. B*, **208** (1980) 385-397.
 - 9) J. H. Rieger and D. T. Lawton: "Processing differential image motion," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 354-360.
 - 10) E. C. Hildreth: "Recovering heading for visually-guided navigation," *Vision Res.*, **32** (1992) 1177-1192.
 - 11) C. S. Royden: "Mathematical analysis of motion-opponent mechanisms used in the determination of heading and depth," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2128-2143.
 - 12) J. A. Perrone: "Model for the computation of self-motion in biological systems," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 177-194.
 - 13) J. Beintema and A. V. van den Berg: "Heading detection using motion templates and eye velocity gain fields," *Vision Res.*, **38** (1998) 2155-2179.
 - 14) S. Grossberg, E. Mingolla and C. Pack: "A neural model of motion processing and visual navigation by cortical area MST," *Cereb. Cortex*, **9** (1999) 878-895.
 - 15) J. A. Perrone and L. S. Stone: "A model of self-motion estimation within primate extrastriate visual cortex," *Vision Res.*, **34** (1994) 2917-2938.
 - 16) H. Saito, M. Yukiie, K. Tanaka, K. Hikosaka, Y. Fukada and E. Iwai: "Integration of direction signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey," *J. Neurosci.*, **6** (1986) 145-157.
 - 17) 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," *J. Neurophysiol.*, **62** (1989) 626-641.
 - 18) K. H. Britten and R. J. A. van Wezel: "Electrical microstimulation of cortical area MST biases heading perception in monkeys," *Nat. Neurosci.*, **1** (1998) 59-63.
 - 19) M. Lappe and J. P. Rauschecker: "A neural network for the processing of optic flow from ego-motion in higher mammals," *Neural Comput.*, **5** (1993) 374-391.
 - 20) D. J. Heeger and A. Jepson: "Subspace methods for recovering rigid motion I: Algorithm and implementation," *Int. J. Comput. Vision*, **7** (1992) 95-117.
 - 21) J. E. Cutting: *Perception with an Eye for Motion* (The MIT Press, Cambridge, 1986).
 - 22) J. E. Cutting: "Wayfinding on foot from information in retinal, not optical flow," *J. Exp. Psychol. Gen.*, **121** (1992) 41-72.
 - 23) M. Hanada and Y. Ejima: "A model of human heading judgement in forward motion," *Vision Res.*, **40** (2000) 243-263.

(2000年11月30日受理)