

視覚情報と体性感覚情報の不一致による迂回行動時の 身体制御に用いられる視覚的手がかりの分離¹

松 宮 一 道*・安 藤 広 志**

東北大学電気通信研究所*

情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所**

Inconsistency between visual and somatosensory information separates visual cues for the control of locomotion during obstacle avoidance

Kazumichi MATSUMIYA*, Hiroshi ANDO**

*Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University**

*Universal Communication Research Institute, National Institute of
Information and Communications Technology***

To avoid obstacles, the brain may use optic flow for locomotor control or it may simply use the perceived direction of an obstacle. We tested these hypotheses in an immersive virtual environment using Warren et al.'s (2001) method where optic flow is displaced from the direction of locomotion provided by somatosensory information. To steer the body around a vertical axis, locomotor control depends on the optic flow with a focus of expansion (FOE) on the obstacle, suggesting that the brain uses optic flow to avoid an obstacle.

Key words: locomotion, visuo-somatosensory inconsistency, optic flow, egocentric direction, obstacle avoidance

はじめに

我々が障害物を回避するために迂回行動を行っているとき、障害物に身体が軽く接触することはあっても、深刻な衝突を引き起こすことはほとんどない。このような迂回行動を行うには、自己身体移動の方向制御が必要となる。自己身体移動の視覚制御においてオブティックフロー（自己身体の動きにより生成される網膜像の運動パターン；Gibson, 1950）が重要な役割を担っていることは多くの研究により示唆されているが（Crowell &

Banks, 1996; Li & Warren, 2000; Royden, Banks, & Crowell, 1992; Royden, Crowell, & Banks, 1994; van den Berg, 1992; Warren & Hannon, 1988; Warren, Morris, & Kalish, 1988）、それらの研究は自己身体移動の知覚応答を測定しており、行動応答を測定していない。後述する最近の研究においては自己身体移動時の行動応答を測定しているが（Rushton, Harris, Lloyd, & Wann, 1998; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001）、障害物を回避するような迂回行動時のオブティックフローの役割に関しては調べていない。そこで、本研究では、障害物との衝突を回避する迂回行動下での自己身体移動の方向制御においてオブティックフローがどのように利用されているのかを明らかにすることを目的とする。

自己身体移動の方向を制御するときの視覚の手がかりには、オブティックフローだけでなく、自己身体から移動目標位置までの方向（自己中心的方向）もあることが指摘されている（Rushton, Harris, Lloyd, & Wann, 1998;

* Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

** 2-2-2, Hikaridai, Keihanna Science City, Kyoto 619-0288, Japan

¹ 本研究は科研費(21700234), および、東北大学電気通信研究所・独創的研究支援プログラムの助成を受けたものである。

Harris & Rogers, 1999; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001)。特に、歩行時の身体移動方向の視覚制御においては、オブティックフローは用いられておらず、自己中心的方向だけが用いられている可能性が指摘されている (Rushton et al., 1998)。Warren ら (2001) は、歩行時の身体移動の視覚制御においてオブティックフローと自己中心的方向のどちらが用いられているのかを調べるために、バーチャルリアリティ技術を用いて、次のような実験方法を開発した。彼らは、仮想空間内に、自己中心的方向の手がかりを与える仮想物体を呈示し、それをゴールとし、ヘッドマウントディスプレイを装着した実験参加者に仮想空間内のスタート地点から仮想物体によって示されるゴールまで歩くよう教示した。実験参加者が仮想空間内を歩くと、ディスプレイ上にオブティックフローが呈示されるが、そのフローの湧き出し口の位置が物理的に正しい位置から右に 10 deg ずれた位置に呈示された (通常は、フローの湧き出し口は実験参加者の身体移動方向と一致する)。このような状況では、オブティックフローの湧き出し口が右に 10 deg ずれているため、自己中心的方向の手がかりを与えるゴールに向かって歩こうとすると、そのゴールの位置は実験参加者の左方向にずれていくことになる。もし実験参加者が自己中心的方向の手がかりを使って歩行時の身体移動方向の視覚制御を行っているならば、実験参加者は歩くたびに左方向にずれていくゴールを追いかけるような状況になるため、歩行軌跡はカーブの形状を描くことになる。一方、もし実験参加者がオブティックフローの手がかりを使って歩行時の身体移動方向の視覚制御を行っているならば、フローの湧き出し口を、ゴールを示す仮想物体と重ねようとするため、歩行軌跡は直線を描くことになる。このように仮想空間内でフローの湧き出し口をずらすと、利用する手がかりに応じて歩行の軌跡が変わる。このような方法を用いて、Warren らは、背景刺激の面積を変えることでオブティックフローの呈示面積を制御した。その結果、オブティックフローの呈示面積が増大すると、歩行軌跡がカーブ形状から直線に移行していくことが示された。したがって、Warren らの実験方法を用いれば、身体移動の視覚制御においてオブティックフローと自己中心的方向の 2 つの手がかりを分離することができる。

しかしながら、障害物との衝突を回避する迂回行動下での身体方向制御において、オブティックフローと自己中心的方向のどちらが利用されているのかは明らかにされていない。上述した Warren らの実験方法を用いると、オブティックフローによる自己移動方向を、体性感覚から得られる自己移動方向から右に 10 deg ずらして呈示し、かつ

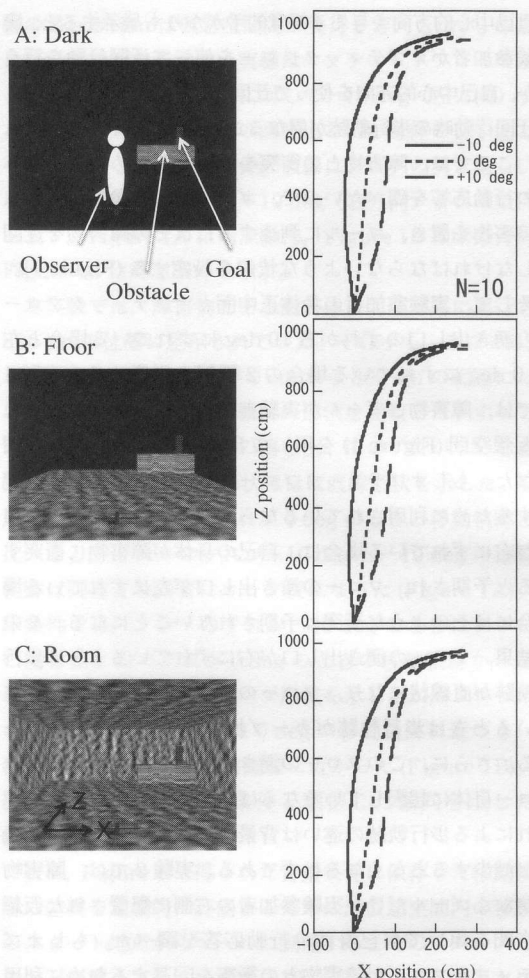


Figure 1. Three virtual environments and mean path under the condition that the obstacle and the goal were placed on the right side of the virtual world. (A) Dark condition: Background was drawn in black. (B) Floor condition: the textured surface was presented on the ground. (C) Room condition: The textured surfaces were presented on the frontal, left, and right walls and the ground. The obstacle and the goal were presented in the virtual environments, and the observer must avoid the obstacle to arrive at the goal. The right column represents mean path in the virtual world. In this experiment, a radial pattern of optic flow is produced with a focus of expansion (FOE) in the direction of simulated locomotion. The FOE was displaced by an angle of -10 , 0 , or $+10$ deg from the actual direction of the body orientation around the vertical axis. The solid, the dotted and the broken lines represent the FOE displacements of -10 , 0 , $+10$ deg, respectively. Ten subjects participated in this experiment. Data were averaged for the ten subjects.

自己中心的方向を与える視覚的手がかりも呈示すると、実験参加者がオブティックフローを使って迂回行動を行うか、自己中心的方向を使って迂回行動を行うかによって、迂回行動時の歩行軌跡が異なることが予想される。

ここでは、障害物との衝突を回避するための自己身体の行動応答を調べたいので、ゴールと実験参加者の間に障害物を置き、ゴールに到達するにはその障害物を迂回しなければならないような状況を設定する (Figure 1)。そして、実験参加者の身体正中面とオブティックフローの湧き出し口のずれが右 10 deg にずれている場合と左 10 deg にずれている場合の 2 種類を用意する。実験 1 では、障害物とゴールが実験参加者の右側に配置された仮想空間 (Figure 1) を用いて自己身体の行動応答を調べた。もしオブティックフローが障害物との衝突を回避するために利用されているならば、フローの湧き出し口が右にずれている場合に、自己の身体が障害物に衝突すると予期され、フローの湧き出し口が左にずれている場合にはそのような衝突は予期されないことになる。その結果、フローの湧き出し口が右にずれているときは歩行軌跡が直線状になり、フローの湧き出し口が左にずれているときは歩行軌跡がカーブ状になることが予想される。さらに、このフローの湧き出し口のずれの効果がフロー自体に起因しているならば、湧き出し口の左右のずれによる歩行軌跡の違いは背景に呈示されるフローの量が減少するとなくなるはずである。実験 2 では、障害物がなくゴールだけが実験参加者の右側に配置された仮想空間を用いて自己身体の行動応答を調べた。もしオブティックフローが障害物との衝突を回避するために利用されているならば、障害物がない場合は、フローの湧き出し口が左に 10 deg ずれたときと右に 10 deg ずれたときで、フローの湧き出し口のずれによる歩行軌跡の差異はなくなることが予想される。実験 3 では、障害物とゴールが実験参加者の正面に配置された仮想空間を用いて自己身体の行動応答を調べた。オブティックフローの湧き出し口が障害物と重なるときに身体制御がフローに依存するならば、正面に障害物を配置し、障害物の右側から迂回してゴールに移動する場合は、実験 1 の結果と反対の結果になることが予想される。すなわち、フローの湧き出し口が右にずれているときは歩行軌跡がカーブ状になり、フローの湧き出し口が左にずれているときは歩行軌跡が直線状になるはずである。

実験 1

方法

装置 本実験では、刺激呈示のために、視覚環境シ

ミュレータ (Visual Environmental Simulator; VES) を用いた (Matsumiya & Ando, 2009)。VES は、前面、左右、床面の計 4 カ所にスクリーン (2×2 m) を配置しており、各々のスクリーンに 2 台の DLP プロジェクターが備え付けられ、プロジェクターからスクリーンに像を投影する際にミラーを介すようになっている。各々のスクリーンに備え付けられた 2 台の DLP プロジェクターの一方が左目用ともう一方が右目用になるように、左右眼で光の位相が 90 度ずれるような円偏光板をプロジェクターの前に置き、円偏光板眼鏡を実験参加者にかけさせることで多面スクリーンの立体映像呈示を実現している。このように VES 内では、実験参加者の左右視野および下視野に関しては完全にディスプレイに覆われているため、視野が制限されているヘッドマウントディスプレイ (Warren et al., 2001) に比べてオブティックフローの効果をより効果的に引き出せる利点がある (Brandt, Dichgans, & Koenig, 1973)。さらに、VES は 4 台の PC で構成されており、各 PC が 1 つのスクリーンを制御している (画面のリフレッシュレート: 30 Hz)。しかし、実際にプログラム上で VES を制御するときには、4 台の PC を意識しないで済むように MDC と呼ばれる旭エレクトロニクス社によって開発された PC クラスターにより、1 台がマスターで残りの 3 台がスレーブのネットワークを構築しており、マスター PC だけですべてのスクリーンをリアルタイムで制御できるようになっている。VES は、バーチャルリアリティシステムとして開発されたものであるため、ポインティングデバイスやポジショセンサーと映像とのリンクをリアルタイムで操作できるようになっている。本実験では、実験参加者の頭部をトラッキングするためのポジショセンサー (偏光眼鏡に装着させて使用)、実験参加者の応答用ボタンとして使うワンド、そして、身体の胸部中央に付加するポジショセンサーを用いた。また、実験参加者の頭部をトラッキングするためのポジショセンサーは、VES 内での実験参加者の頭部の動きに応じて、立体画像を生成する計算を補正するために用いられた。

視覚刺激 刺激は模擬的な迂回行動を実験参加者に行わせるために、障害物 (テクスチャ付の茶色の直方体; 幅 300 cm, 高さ 100 cm, 奥行き 100 cm) の背後にゴール (赤い円柱; 半径 20 cm, 高さ 170 cm) を呈示し、実験参加者の最初の立ち位置を示すクロスマークが床面に呈示された (Figure 1)。暗黒条件では背景が暗黒 (Figure 1A)、床条件では床面にテクスチャを張り (Figure 1B; 幅 1,000 cm, 奥行き 1,200 cm)、部屋条件では周囲全体にテクスチャを張った (Figure 1C; 幅 1,000 cm, 高

さ 300 cm, 奥行き 1,200 cm)。これより、背景に依存してフローの量を変えた。また、これらの背景条件は試行ごとにランダムに呈示された。

VES 内で実際に歩行することは困難であるので、ここでは一定速度 (170 cm/s) で仮想空間を移動させることで、実験参加者の前進歩行を模擬的に提示した。すなわち、試行の開始と同時に、実験参加者の意図と関係なく、仮想空間が一定速度で動いた。実験参加者にはゴール (円柱) に到達するための行動を行わせる必要があったので、仮想空間の移動方向を実験参加者の身体の垂直軸周りの回転により制御させた。これが模擬的な迂回行動を実現させた。実験参加者に胸の中央部分にポジションセンサーを装着させ、仮想空間に対する身体の垂直軸周りの方位と仮想空間内の身体的位置をリアルタイムで計測した。そして、センサーから得られた身体の垂直軸周りの方位に基づいて、身体の前正中面からフローの湧き出し口を常に一定の角度でずれるようにした。ここで用いられたずれは、 -10 deg (左方向), 0 deg , $+10\text{ deg}$ (右方向) の 3 種類であり、これらは試行ごとにランダムに変化した。

手続き 最初に、実験参加者は右手にワンドを持ち、床面に呈示されたクロスマークの上に立った。ワンドのボタンを押すと仮想空間が動き始め、実験参加者は障害物である直方体 (直方体の中心位置をクロスマークから奥行き 870 cm, 右 350 cm あるいは正面 0 cm の位置に配置) の背後に配置された、ゴールの円柱 (円柱の中心位置をクロスマークから奥行き 950 cm, 右 450 cm あるいは正面 0 cm の位置に配置) にたどり着くように自己身体の操舵を同じ位置に静止したまま身体の垂直軸周りの回転によって行った。ゴールの中心から半径 100 cm 以内に到達したところで仮想空間の動きが止まり、次の試行へ移った。1 セッションは、背景条件 3 条件 × フローの湧き出し口のずれ 3 種類 × 繰り返し 4 回の計 36 試行であった。実験参加者は 2 セッションを行った。

実験参加者 この実験には、著者 2 名を含む 10 名が参加し、男性が 8 名、女性が 2 名であった。実験参加者全員が正常もしくは矯正正常視力であった。著者 2 名を除く 8 名の実験参加者は他の心理物理実験に参加した経験を持っていたが、本実験の目的は知らなかった。

結果と考察

Figure 1 に、障害物とゴールが右側に配置された仮想空間において、実験参加者がゴールに到達するまでに仮想平面内を移動した軌跡 (実験参加者 10 名の平均値) を示す。横軸の X position は仮想空間内の左右方向を、縦

軸の Z position は仮想空間内の奥行き方向を示す。原点は移動開始地点を示す。実線はオブティックフローの湧き出し口が身体の前正中面に対して -10 deg (左方向) ずれた条件、点線はフローの湧き出し口が身体の前正中面と一致している 0 deg の条件、破線はフローの湧き出し口が身体の前正中面に対して $+10\text{ deg}$ (右方向) ずれた条件を表す。Figure 1A は暗黒条件、Figure 1B は床条件、Figure 1C は部屋条件を示す。

本実験では、障害物である直方体の前面は常に奥行き 820 cm の位置に呈示されていた。それゆえ、ここでは、グラフ上の Z position が 0 cm から 800 cm の範囲において、実験参加者の移動軌跡の形状を比較した。すべての条件において、フローの湧き出し口のずれがないとき (0 deg) は、移動軌跡の形状はほぼ直線形状を示した。暗黒条件では、フローのずれが 0 deg のときの移動軌跡と比べると、フローのずれが $+10\text{ deg}$ と -10 deg の移動軌跡は両方とも顕著にカーブ状になった (Figure 1A)。床条件では、フローのずれが -10 deg のときはフローの湧き出し口のずれが 0 deg のときの移動軌跡から逸れて暗黒条件と同様のカーブ形状を示したが、フローのずれが $+10\text{ deg}$ のときは 0 deg の移動軌跡に近づき、移動軌跡の形状が比較的直線に近かった (Figure 1B)。部屋条件の結果は、床条件と類似した傾向を示した (Figure 1C)。

次に、Figure 1 で得られた背景条件に依存した移動軌跡の差異を定量的に評価するために、仮想空間内の移動のスタート地点からゴールに到達するまでのフレームごとの x 座標をフローのずれ -10 , 0 , $+10\text{ deg}$ の各々に対して抽出し、 -10 deg の x 座標から 0 deg の x 座標の差分および $+10\text{ deg}$ の x 座標から 0 deg の x 座標の差分をフレームごとに算出した。そして、各フローのずれに対して、フレームごとに得られた差分データをすべて平均したものを移動軌跡の差異と定義した。このように定義された移動軌跡の差異を各実験参加者に対して算出し、実験参加者 10 名分の算出結果を平均した結果が Figure 2 である。Figure 2 では、縦軸が移動軌跡の差異を示し、横軸が背景条件を示す。棒グラフのシンボルについては、斜線がフローのずれが -10 deg のときの結果を、灰色がフローのずれが $+10\text{ deg}$ のときの結果を示す。Figure 2 より、背景条件による移動軌跡の差異の変化は、フローのずれが -10 deg の場合と $+10\text{ deg}$ の場合で異なった。2 つのフロー条件 (-10 deg のずれ, $+10\text{ deg}$ のずれ) と 3 つの背景条件 (暗黒, 床, 部屋) を使って、実験参加者 10 名のデータに対して 2 元配置の繰り返しあり分散分析 (被験者内要因) を行った。そ

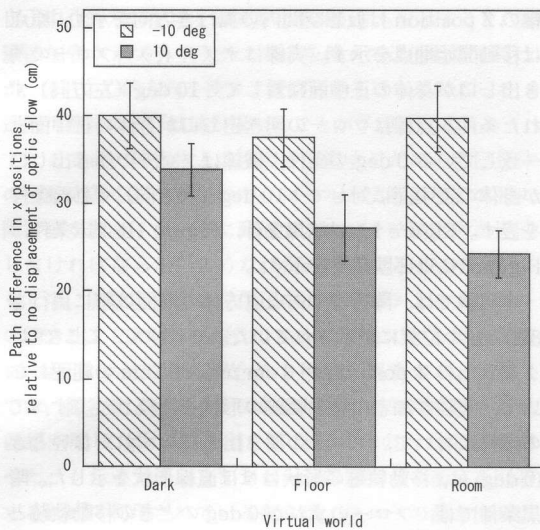


Figure 2. Path difference from the FOE displacement of 0 deg across three virtual worlds under the condition that the obstacle and the goal were placed on the right side of the virtual world. Path difference was calculated by taking the average of the difference in $\times$ positions for each frame from the FOE displacement of 0 deg. The slashed and gray bars represent the FOE displacements of -10 and 10 deg, respectively. Data were averaged for the ten subjects. Error bars represent the SEM.

の結果, フロー条件 ($F(1, 9)=14.953, p<0.005$) と背景条件 ($F(2, 18)=10.759, p<0.001$) において主効果が見られ, フロー条件と背景条件の間に有意な交互作用があった ($F(2, 18)=3.804, p<0.05$)。さらに, 1つのフロー条件の中で背景の影響があるかどうかを分析するために, 下位検定として単純主効果の検定を行うと, フローのずれが-10 deg のときは背景による差は統計的に有意でなかったが ($F(2, 36)=0.625, p=0.541 ns$), フローのずれが+10 deg のときは背景による差は統計的に有意であった ($F(2, 36)=6.808, p<0.005$)。また, 下位検定としてライアン法による多重比較を行うと, フローのずれが+10 deg のときに, 暗黒条件と部屋条件 ($t=3.606, p<0.001$), 暗黒条件と床条件 ($t=2.479, p<0.05$) の間で統計的に有意な差があった。

以上の結果をまとめると, 次のようになる。(i) フローのずれが-10 deg のときは, フローのずれがないときと比べて移動軌跡はよりカーブ形状を示し, この傾向は背景から得られるフローの有無に依存しない。(ii) フローのずれが+10 deg のときは, 背景のフローの有無

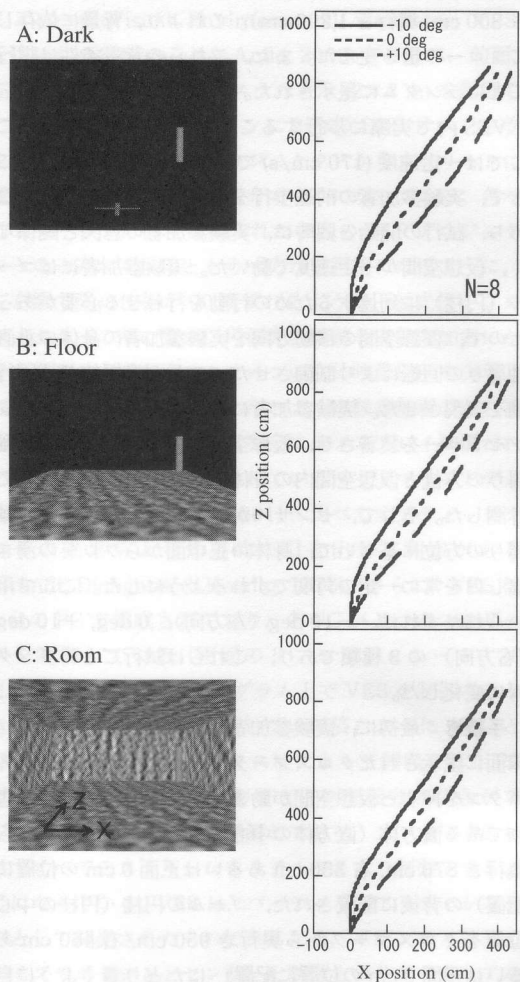


Figure 3. Mean path under the condition that the goal was only placed on the right side of the virtual world without the obstacle. (A) Dark condition; (B) Floor condition; (C) Room condition. The details of figure 3 are the same as Figure 1 except that data are averaged for the eight subjects.

に依存して移動軌跡は変化し, 背景にフローが呈示されると移動軌跡はフローのずれがないときの移動軌跡に類似するようになり直線に近づく。すなわち, フローの湧き出し口のずれが+10 deg のときのみ移動軌跡は背景に呈示されるオプティックフローに依存して変化する。

実験 2

方法

装置, 視覚刺激, 手続き 実験2では, 実験1と同じ装置を使って, 障害物がなくゴールだけが右側に配置さ

れた仮想空間が提示された (Figure 3)。仮想空間内に障害物が提示されていないことを除けば、刺激変数 (背景条件 3 条件、フローの湧き出し口のずれ 3 種類) および実験手続きは実験 1 と同じであった。

実験参加者 この実験には、著者 1 名を含む 8 名の実験参加者が参加し、男性が 7 名、女性が 1 名であった。実験参加者全員が実験 1 にも参加していた。

結果と考察

Figure 3 に、障害物がなくゴールだけが右側に配置された仮想空間において、実験参加者がゴールに到達するまでに仮想平面内を移動した軌跡 (実験参加者 8 名の平均値) を示す。図の見方は、Figure 1 と同じである。

Figure 3 においても、グラフ上の Z position が 0 cm から 800 cm の範囲において、実験参加者の移動軌跡の形状を比較した。すべての条件において、フローの湧き出し口のずれがないとき (0 deg) は、移動軌跡の形状はほぼ直線形状を示した。暗黒条件では、フローのずれが 0 deg のときの移動軌跡と比べると、フローのずれが +10 deg と -10 deg の移動軌跡は両方とも緩やかなカーブ状になった (Figure 3A)。床条件では、フローのずれが -10 deg のときと +10 deg のときの両方において 0 deg の移動軌跡に近づき、移動軌跡の形状が比較的直線に近かった (Figure 3B)。部屋条件の結果は、床条件と類似した傾向を示した (Figure 3C)。

移動軌跡の差異を各実験参加者に対して算出し、実験参加者 8 名分の算出結果を平均した結果が Figure 4 である。図の見方は Figure 2 と同じである。Figure 4 より、背景条件による移動軌跡の差異の変化は、フローのずれが -10 deg の場合と +10 deg の場合で同じ傾向であった。2 つのフロー条件 (-10 deg のずれ, +10 deg のずれ) と 3 つの背景条件 (暗黒, 床, 部屋) を使って、実験参加者 8 名のデータに対して 2 元配置の繰り返しあり分散分析 (被験者内要因) を行った。その結果、フロー条件において主効果は見られなかった ($F(1, 7) = 3.372, p = 0.109$ ns)。しかし、背景条件においては主効果が見られた ($F(2, 14) = 12.733, p < 0.001$)。また、フロー条件と背景条件の間に交互作用はなかった ($F(2, 14) = 0.107, p = 0.899$ ns)。したがって、障害物がいないときは、障害物があるときと異なり、自己身体の移動軌跡の形状はフローのずれが -10 deg と +10 deg のときで変わらないことを示している。これより、障害物がある仮想空間において、背景に呈示されるオブジェクトフローに依存して移動軌跡が変化するという結果 (Figures 1, 2) は、障害物の有無に依存することが示唆される。

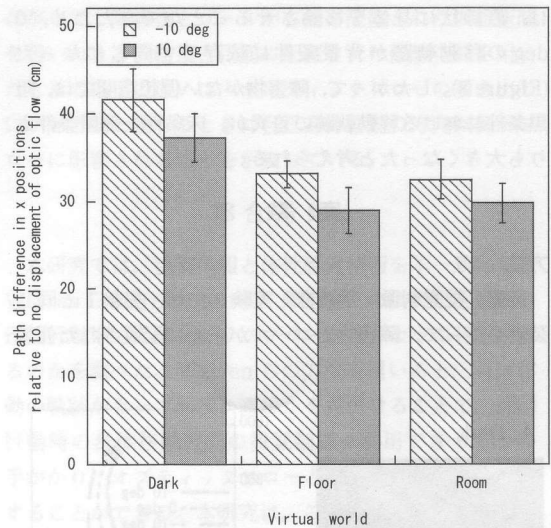


Figure 4. Path difference from the FOE displacement of 0 deg across three virtual worlds under the condition that the goal was only placed on the right side of the virtual world without the obstacle. The details of Figure 4 are the same as Figure 2 except that data are averaged for the eight subjects.

しかし、Figure 4 より、暗黒条件の移動軌跡の差異は床条件と部屋条件に比べて大きくなる傾向があり、下位検定としてライアン法による多重比較を行うと、暗黒条件と床条件 ($t = 4.395, p < 0.001$)、暗黒条件と部屋条件 ($t = 4.345, p < 0.001$) の間で統計的に有意な差があった。障害物がない仮想空間では、移動開始地点から迂回することなく直線的にゴールに移動することができるため、Warren ら (2001) の実験条件に類似していた。Warren らは、背景にフローがないときに移動軌跡が湾曲し、背景に湧き出し口のずれたフローがあるときに移動軌跡が直線になることを報告しており、Figure 4 の結果は Warren らの結果と一致している。これより、本研究は、Warren らの研究と異なり、実際に歩行はさせていないが、Warren らが報告した歩行制御におけるフローの効果と同じ効果が本研究においても抽出できていると考えられる。しかしながら、障害物がある仮想空間でフローが -10 deg ずれたときの移動軌跡の差異は、障害物がない仮想空間と異なり、背景に依存しなかった (Figure 2)。これは、フローのずれがない 0 deg のときの移動軌跡が背景に依存して変わるためであると考えられる。Figure 1 に示されるように、暗黒条件の 0 deg の移動軌跡は、床条件と部屋条件の 0 deg の移動軌跡よりも左側に偏る傾向があった。一方、障害物がない仮想空間で

は、直線状に身体を移動させることができたため、0 degの移動軌跡が背景条件に依存せず同じになった (Figure 3)。したがって、障害物がない仮想空間では、暗黒条件における移動軌跡の差異が、床条件と部屋条件よりも大きくなったと考えられる。

実験 3

方法

装置、視覚刺激、手続き 実験3では、実験1と同じ装置を使って、障害物とゴールが正面に配置された仮想

空間が提示された (Figure 5)。障害物とゴールの配置が異なることを除けば、刺激変数 (背景条件3条件、フローの湧き出し口のずれ3種類) および実験手続きは実験1と同じであった。

実験参加者 この実験には、著者1名を含む8名の実験参加者が参加し、男性が7名、女性が1名であった。実験参加者全員が実験1と実験2にも参加していた。

結果と考察

Figure 5に、障害物とゴールが正面に配置された仮想空間において、実験参加者がゴールに到達するまでに仮想平面内を移動した軌跡 (実験参加者8名の平均値)を示す。図の見方は、Figure 1と同じである。この条件では、常に障害物の右側から迂回するよう実験参加者は指示されていた。

Figure 5においても、グラフ上のZ positionが0 cmから800 cmの範囲において、実験参加者の移動軌跡の形状を比較した。暗黒条件では、フローのずれが0 degのときの移動軌跡と比べると、フローのずれが+10 degと-10 degの移動軌跡は両方ともフローの湧き出し口のずれが0 degの移動軌跡から逸れた (Figure 5A)。床条件では、フローのずれが-10 degのときはフローの湧き出し口のずれが0 degの移動軌跡に近づき、フローのずれが+10 degのときは0 degのときの移動軌跡から逸れた (Figure 5B)。部屋条件の結果は、床条件と類似した傾向を示した (Figure 5C)。

移動軌跡の差異を各実験参加者に対して算出し、実験参加者8名分の算出結果を平均した結果が Figure 6である。図の見方は Figure 2と同じである。Figure 6より、背景条件による移動軌跡の差異の変化は、フローのずれが-10 degの場合と+10 degの場合で異なった。2つのフロー条件 (-10 degのずれ, +10 degのずれ) と3つの背景条件 (暗黒, 床, 部屋) を使って、実験参加者8名のデータに対して2元配置の繰返しあり分散分析 (被験者内要因) を行った。その結果、フロー条件 ($F(1, 7) = 27.176, p < 0.005$) と背景条件 ($F(2, 14) = 5.865, p < 0.05$) において主効果が見られ、フロー条件と背景条件の間で有意な交互作用があった ($F(2, 14) = 5.014, p < 0.05$)。さらに、1つのフロー条件の中で背景の影響があるかどうかを分析するために、下位検定として単純主効果の検定を行うと、フローのずれが-10 degのときは背景による差は統計的に有意であったが ($F(2, 28) = 10.745, p < 0.001$)、フローのずれが+10 degのときは背景による差は統計的に有意でなかった ($F(2, 28) = 0.023, p = 0.977 \text{ ns}$)。また、下位検定としてラ

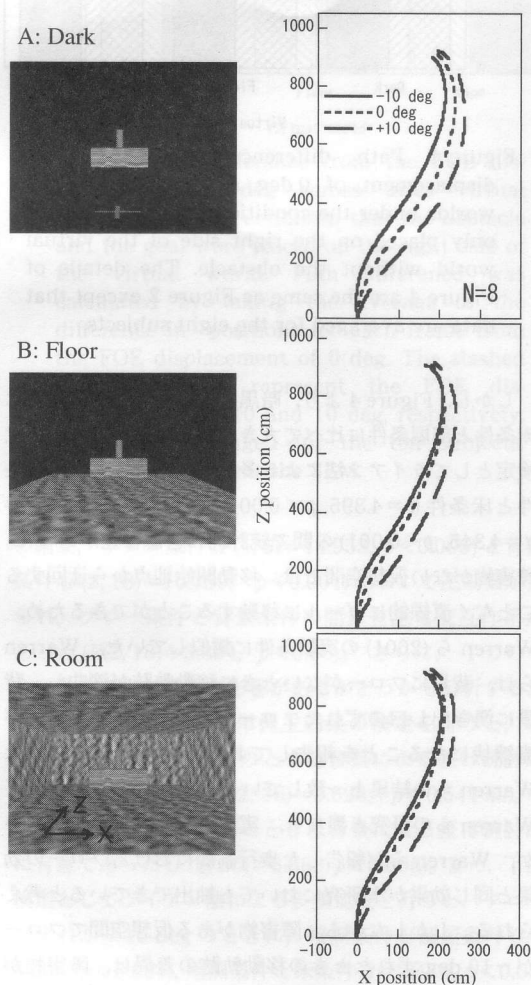


Figure 5. Mean path under the condition that the obstacle and the goal were placed in front of the subjects at the beginning of trials. (A) Dark condition; (B) Floor condition; (C) Room condition. The details of Figure 5 are the same as Figure 1 except that data are averaged for the eight subjects.

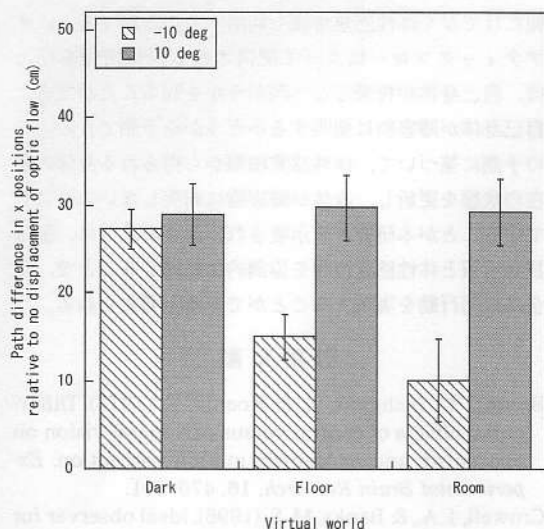


Figure 6. Path difference from the FOE displacement of 0 deg across three virtual worlds under the condition that the obstacle and the goal were placed in front of the subjects at the beginning of trials. The details of Figure 6 are the same as Figure 2 except that data are averaged for the eight subjects.

イアン法による多重比較を行うと、フローのずれが -10 deg のときに、暗黒条件と部屋条件 ($t=4.500$, $p<0.0005$), 暗黒条件と床条件 ($t=3.216$, $p<0.005$) の間で統計的に有意な差があった。

以上の結果をまとめると、次のようになる。(i) フローのずれが -10 deg のときは、背景のフローの有無に依存して移動軌跡が変化し、背景にフローが呈示されると移動軌跡はフローのずれがないときの移動軌跡に類似するようになる。(ii) フローのずれが $+10$ deg のときは、フローのずれがないときの移動軌跡よりも逸れて、この傾向は背景から得られるフローの有無に依存しない。すなわち、フローの湧き出し口のずれが -10 deg のときのみ移動軌跡は背景に呈示されるオブティックフローに依存して変化する。これらの結果は、障害物とゴールが右側に配置された仮想空間を用いたときの結果 (Figure 2) と反対の結果であった。すなわち、フローのずれが -10 deg の場合と $+10$ deg の場合の背景条件による移動軌跡の差異の変化が、フローのずれに対して逆の結果になった。障害物とゴールが右側に配置された仮想空間では、障害物の左側から迂回してゴールに到達するが、障害物とゴールが正面に配置された仮想空間を用いたときは、障害物の右側から迂回してゴールに到達した。し

たがって、障害物とゴールが右側に配置された仮想空間を用いたときの結果と正面に配置された仮想空間を用いたときの結果の違いは、オブティックフローの湧き出し口が障害物と重なるときに自己身体移動の方向制御がフローに影響されることを示唆している。

総合考察

本研究では、視覚情報と体性感覚情報を不一致にする Warren らの方法を用いて、障害物との衝突を回避する迂回行動下でオブティックフローがどのように利用されるのかを調べた。Warren らの方法を用いると、身体移動の軌跡がカーブ形状か直線かを見分けることで、迂回行動時の身体移動方向の視覚制御に利用できる2つの手がかり、オブティックフローと自己中心的方向を分離することができる。本研究は、この Warren らの方法を迂回行動時の身体移動に適用した。オブティックフローが障害物との衝突を回避するために利用されているならば、フローの湧き出し口が障害物と重なる場合にフローの手がかりを使って身体移動を制御し、フローの湧き出し口が障害物と重ならない場合に自己中心的方向の手がかりを使って身体移動を制御することが予想された。本実験の結果は、フローの湧き出し口のずれが障害物と重なるときに、背景にオブティックフローが呈示されることで移動軌跡が直線に近づくことを示した。一方、フローの湧き出し口のずれが障害物と重ならないときは、背景に呈示されたフローに依存せず、身体移動軌跡はカーブ形状を示した。これらの結果は、フローの湧き出し口のずれが障害物と重なるときのみ、身体移動方向を制御するためにフローが利用されていたことを示している。

近年の研究は、歩行制御においてオブティックフローと自己中心的方向の2つの視覚的手がかりの存在を示している (Rushton et al., 1998; Harris & Rogers, 1999; Warren et al., 2001)。Rushton et al. (1998) は、プリズムを使って歩行方向とフローの湧き出し口をずらした実験を行い、オブティックフローの湧き出し口がずれていても歩行によりゴールに到達できることから、フローは歩行制御に用いられていないと結論づけた。このとき、歩行制御に利用できる手がかりとして、自己中心的方向があることを Rushton らは示唆した。しかしながら、Rushton らが行った実験環境は、あまり周囲に建物などが無い場所で実験を行っていたため、フロー自体があまり含まれていなかった。そのことに気づいた Warren et al. (2001) は、バーチャルリアリティ技術を用いて、仮想環境内でオブティックフローの呈示面積を刺激変数

として、Rushton らと同じ実験を行ったところ、歩行制御にフローが使われていることを示した。さらに、歩行制御におけるフローの利用は周囲の環境に依存することを Warren らは見いだした。つまり、フローの呈示面積が広い場合には、歩行制御にフローが利用されるが、フローの呈示面積が狭い場合には、歩行制御に自己中心的方向が利用されることを明らかにした。しかしながら、このようにオブティックフローが歩行制御に利用されていることは示されているが、どのような状況で利用されるのかは明らかではなかった。本研究では、障害物との衝突を回避するための迂回行動下でフローが利用されているということを明らかにした。

本研究は、迂回行動において脳はフローを使って身体の方向を制御していることを示唆しており、フローが身体制御のために使われるには、障害物が目の前に呈示されている必要があることを示唆する。しかし、Warren らは、歩行制御においてフローを利用する際に障害物が必要かどうかは言及していない。それにもかかわらず、歩行制御においてフローが用いられたのはなぜなのであろうか。これに関して、少なくとも2つの可能性が考えられる。1つは、視覚-体性感覚間の不一致の導入の仕方の違いである。Warren らの研究では、フローが+10 deg にずれた場合のみを用いていたが、本研究では-10 deg と+10 deg の2種類のフローのずれを用いていた。身体制御においてフローを利用する際の障害物の必要性を示すには、本実験のように、フローのずれが障害物に重なる場合と重ならない場合の2通りを用意する必要があると思われる。実際、Warren らが用いた視覚刺激には、障害物が含まれており、その障害物にフローが重なるような刺激になっていた。それゆえ、Warren らは、障害物の必要性に気づけなかったのかもしれない。

二つ目の可能性は、実験参加者の行動の違いである。Warren らは、ヘッドマウントディスプレイを実験参加者に装着させ、仮想空間内を実際に歩かせていた。一方、本研究では、VES 内で実験参加者は歩かず、身体の向きを変えるために垂直軸回りに身体を回転させていた。このような行動の違いが、身体制御系のフローの利用方法を変えていたのかもしれない。すなわち、Warren らの研究のように実際に歩行する場合には、障害物がなくても身体制御にフローが利用でき、本研究のように身体の向きのみを変える行動の場合には、身体制御にフローを利用するために障害物が呈示される必要があるのかもしれない。この点を明らかにするには、さらなる研究が必要であろう。

迂回行動時の身体移動を制御するために、脳は視覚情

報だけでなく体性感覚情報も利用することができる。オブティックフローによって提供される視覚情報を使えば、自己身体が将来どこへ向かうかを知ることができ、自己身体が障害物に衝突するかどうかを予測できる。この予測に基づいて、体性感覚情報から得られる身体の現在の状態を更新し、身体が障害物に衝突しないようにしていることが本研究から示唆される。このように、脳は視覚情報と体性感覚情報を協調的に処理することで、安全な迂回行動を実現することができると考えられる。

引用文献

- Brandt, T., Dichgans, J., & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, **16**, 476-491.
- Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1996). Ideal observer for heading judgments. *Vision Research*, **36**, 471-490.
- Gibson, J. (1950). Perception of the visual world. Boston: Houghton Mifflin.
- Li, L., & Warren, W. H., Jr. (2000). Perception of heading during rotation: Sufficiency of dense motion parallax and reference objects. *Vision Research*, **40**, 3873-3894.
- Harris, J. M., & Rogers, B. J. (1999). Going against the flow. *Trends in Cognitive Sciences*, **3**, 449-450.
- Matsumiya, K., & Ando, H. (2009). World-centered perception of 3D object motion during visually guided self-motion. *Journal of Vision*, **9**(1), 15, 1-13.
- Royden, C. S., Banks, M. S., & Crowell, J. A. (1992). The perception of heading during eye movements. *Nature*, **360**, 583-585.
- Royden, C. S., Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1994). Estimating heading during eye movements. *Vision Research*, **34**, 3197-3214.
- Rushton, S. K., Harris, J. M., Lloyd, M. R., & Wann, J. P. (1998). Guidance of locomotion on foot uses perceived target location rather than optic flow. *Current Biology*, **8**, 1191-1194.
- van den Berg, A. V. (1992). Robustness of perception of heading from optic flow. *Vision Research*, **32**, 1285-1296.
- Warren, W., & Hannon, D. (1988). Direction of self-motion is perceived from optical flow. *Nature*, **336**, 162-163.
- Warren, W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, **4**(2), 213-216.
- Warren, W. H., Jr., Morris, M. W., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 646-660.