

原著

異なる速さをもつ2種類のオプティカルフローにより生起するベクションの速さ評価

川島 祐貴, 福田 一帆, 金子 寛彦, 内川 恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム専攻

Speed Estimation of Vection Produced by Two Optical Flows at Different Speeds

Yuki Kawashima, Kazuho Fukuda, Hirohiko Kaneko and Keiji Uchikawa

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

本研究では、同一の空間を異なる速さで拡大する2種類のオプティカルフローを観察した場合に、どのようなベクション（視覚誘導性自己運動感覚）が生起するかを調べた。2種類のオプティカルフローの速さの差を速さ条件とし、オプティカルフローを形成するランダムドット刺激の空間密度比を変数にして、ベクションの速さを評価する実験を行った。その結果、ベクションの速さは、2種類のオプティカルフローの速さの差が小さい場合は、ランダムドット刺激の空間密度比に伴って線形に変化した。2種類のオプティカルフローの速さの差が大きくなり、オプティカルフローが二つに分離して知覚される場合は、ベクションの速さが遅いオプティカルフローにより決まる場合と両方のオプティカルフローにより決まる場合に分かれた。しかし、後者でも遅いオプティカルフローの速さの寄与が大きいことが明らかになった。このようなベクションの速さ知覚の特性をランダムドット刺激の空間密度比に対する足し合わせモデルによって説明した。

(視覚の科学 33: 152–163, 2012)

キーワード：ベクション、自己運動知覚、オプティカルフロー

We investigated thevection (visually induced self-motion perception) that occurred when 2 optical flows expanded at different speeds in the same space. In the experiments, we set the difference in speed between 2 optical flows as the speed condition, and varied the ratio of the numbers of random dots composing the optical flows. Subjects estimatedvection speed produced by 2 optical flows. The results showed that when the speed difference was small, the estimatedvection speed varied linearly with the ratio of the random dots. When the speed difference was large and the 2 optical flows were perceived to be separate, the results were classified into 2 groups. In one group,vection speed tended to depend upon the slower optical flow, whereas in the other group,vection speed depended upon both optical flows. Even in the latter case, however, the slower optical flow contributed more to thevection speed. To explain these characteristics ofvection speed, we developed a model in whichvection speed was predicted by the summation of the speeds of 2 optical flows, weighted by the ratio of the random dots of each optical flow.

(Jpn J Vis Sci 33: 152-163, 2012)

Key Words : Vection, Self-Motion Perception, Optical Flow

1. はじめに

自己の運動感覚は様々な感覚系からの応答が統合さ

れて生起するが、感覚系のなかでも視覚系の寄与が大きいことが知られている¹⁾。観察者が自己運動をするとき、外界の物体像が網膜上で観察者の運動と逆方向

別刷請求先: 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G2-1 東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム専攻 内川恵二 (2012年10月22日受理)

Reprint requests to: Keiji Uchikawa Dept of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta Midori-ku Yokohama 226-8502, Japan

(Received and accepted October 22, 2012)

に流れ、運動刺激として網膜上に速度場を形成する²⁾。この速度場はオプティカルフローと呼ばれているが、観察者が静止していてもこのオプティカルフローを観察者に呈示すると、観察者は自らが動いているという自己運動を知覚する。この運動感覚はベクション（視覚誘導性自己運動感覚）と呼ばれ、停止した電車内で隣の電車が動いているのを見るとき、自分がそれとあたかも逆方向に動いているように感じるのはその一例である。上下・左右方向のベクションはそれぞれの運動方向に対応した直線フローパターンにより生じ³⁻⁶⁾、前進・後退のベクションはそれぞれ放射・縮小フローパターンにより生じる⁷⁻¹⁰⁾。また、回転ベクションは回転フローパターンにより生じる^{11, 12)}。このように、ベクションには様々な運動方向があるが、いずれにしても実際の自己運動時に起こるオプティカルフローと等しいフローパターンを観察者に与えることによって、それぞれに対応したベクションが生じる¹³⁾。

これまでの過去研究により、ベクションの強度は刺激呈示面積の増加に伴って大きくなること^{12, 14-16)}、周辺視野への呈示の方が中心視野への呈示に比べてより強いベクションを誘導することが報告^{3, 12, 16-17)}され、運動刺激を呈示する面積や視野内の位置がベクション生起に影響を及ぼすことが示されている。また、刺激の速度とベクションの大きさが線形な関係になることも示されている^{16, 18, 19)}。ただし、ベクションの持続時間に関しては刺激呈示面積と速度との間に交互作用があることが示されている²⁰⁾。ほかにも刺激の空間周波数、色や輝度変調、高次認知過程など多くの要因の影響について調べられている^{18, 19, 21-29)}。

観察者の視野内に2種類の異なるオプティカルフローが同時に呈示される場合に生じるベクションについてもこれまでにいくつか報告がなされている。Brandt ら¹⁶⁾は、視野中心部視角 30 deg の領域内と、その外側の視野周辺部 120 deg までの領域内にそれぞれ反対方向に運動する縞刺激を同時に呈示した場合、生じるベクションは周辺視野に呈示された運動刺激により決定されることを示した。また、Ito ら¹⁰⁾は、拡大の中心位置が異なる二つの放射オプティカルフローを、それぞれ手前と奥の平面上に呈示すると、背景となる奥の平面上の運動刺激によってベクションが生じることを明らかにした。刺激の知覚的な奥行きがベクション生起に重要であり、運動刺激を遠くに知覚すればするほどより強いベクションが誘導されるこ

とや、最も遠くの運動刺激がベクションの方向を決定することはほかの多くの研究によっても示されている^{7, 11, 30-33)}。上述した周辺視野の刺激がベクションの生起に重要とする結果も、運動呈示領域が周辺にあること自体は重要でなく、周辺視野の刺激が中心視野の刺激に比べて遠くに見えることがベクションにおける周辺視野の見かけの優位性をもたらしている可能性もある^{30, 33, 34)}。以上のように、観察者の視野内に2種類の異なるオプティカルフローが同時に呈示される場合は、それらの空間的な配置によって、いずれか一方のフローに依存してベクションが決定されることを示す報告が多い。

観察者が自己運動をするとき、外界が静止していると仮定すると自己運動によるオプティカルフローは視野内に1種類のみ生じることになる。ベクションは自己運動により生じるオプティカルフローと同等のオプティカルフローを静止した観察者が見ることで生じる。したがって、ベクション生じメカニズムは何らかの法則に基づいてオプティカルフローを静止外界環境として解釈していると考えられる。観察者の視野内に二つのオプティカルフローが存在するとき、静止外界環境として解釈されるオプティカルフローが一つ選択され、それによってベクションが生じ、その性質が決定されることは実際の環境の状況を考えると理にかなっている^{28, 35)}。しかし、二つのオプティカルフローが同時に存在する場合であっても、それらのいずれもが静止外界環境となり得る場合、あるいはそれらが明確に分離して知覚されずに統合されて新たな一つの運動に知覚される場合もあるが、このような場合にどのような法則に基づいてベクションが生じされるかは明らかではない。

そこで本研究では、二つのオプティカルフローがどちらも静止外界環境として解釈される、もしくはそれらが明確に分離して知覚できない可能性のある状況において、ベクションがどのように生じるかを明らかにすることを目的とする。そのため、本研究では観察者の視野内に速さのみが異なる二つの放射状オプティカルフローを重畠した刺激を呈示して実験を行った。この刺激呈示条件では、二つのオプティカルフローの呈示される視野の大きさ、位置、奥行きは等しいため、これまでに示されている大視野、視野周辺、背景といったベクションを生じさせる運動刺激の要因によってはベクションが一意に決定できることになる。もし、遅いオプティカルフローが静止外界として

解釈されるならば、速いオプティカルフローの刺激は観察者に向かって運動する外界の運動物体として知覚されるが、もし、速いオプティカルフローが静止外界として解釈されるならば、遅いオプティカルフローの刺激は観察者の自己運動と同じ方向に運動する外界の運動物体と知覚されるはずである。また、二つの刺激の運動が分離して知覚されないことも考えられ、この場合にはベクション生起はこのような運動知覚の分離に対応するか、あるいは対応しないかが問題となる。

本研究では2種類の速さをもつ運動物体から作られる放射状オプティカルフローを観察者に呈示し、そのとき観察者が知覚するベクションの生起特性を調べ、そこからベクション生起メカニズムの一端を明らかにすることを目的とした。本研究は二つの実験からなり、実験1では、異なる速さをもつ二つの放射状運動刺激の空間密度比を変化させ、観察者の知覚するベクションの速さを測定した。実験2では、実験1で用いた刺激が被験者にどのような運動として知覚されるかを調べた。

2. 実 験 1

1) 方 法

刺激呈示には開口直径140cmの立体球面ディスプレイ(CyberDome1400, Panasonic社)を使用した

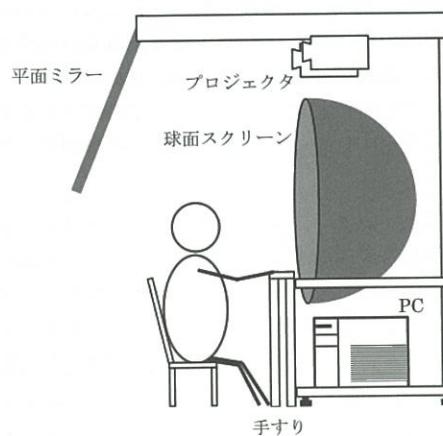


図1 刺激呈示に用いた立体球面ディスプレイ(CyberDome1400, Panasonic社)
球面ディスプレイの開口直径は140cm、刺激の呈示視野範囲は視角120 degである。刺激は2台の液晶プロジェクターによる偏光方式によって立体表示される。球面ディスプレイの手前には手すり(高さ90cm、幅75cm)を設置し、被験者はこの手すりを掴みながら刺激を観察する。

(図1)。視距離は40cmで、刺激の呈示視野範囲は視角120 degであった。2台の液晶プロジェクターによる偏光方式により両眼視差を与えることで刺激は立体表示された。球面ディスプレイの手前にはベクション生起を容易にするために手すり(高さ90cm、幅75cm)を設置した。被験者は椅子に座り、手すりを掴みながら刺激を観察した。被験者の眼の高さがディスプレイの上下の中心位置と等しく、左右の眼の中央がディスプレイの中心にくるように頭部位置を調整した。

刺激には円形ランダムドットを用い、このランダムドットが分布する三次元空間内を観察者が直線運動をする状況をシミュレートすることで観察者の前進運動に対応するオプティカルフローを呈示した(図2)。このシミュレートした運動の速さを刺激の速さ変数とした。ランダムドット刺激の三次元空間内における運動の速さを変えることにより、2種類の放射状オプティカルフローを作成し、球面ディスプレイに重畠して立体呈示した。

シミュレートした三次元空間は奥行き40m、半径20mの円筒形状であり、直径10cmのランダムドット刺激が1,000個その中に描画された。ただし、観察者の進行進路にはランダムドット刺激が存在しないようにするために、円筒の中心軸から半径2mの範囲を除いて描画された。シミュレートした観察者の視点の位置はランダムドットの描写される円筒空間の端から40cm手前であり、実際の観察視距離と一致させた。ランダムドット刺激によるオプティカルフローの拡大

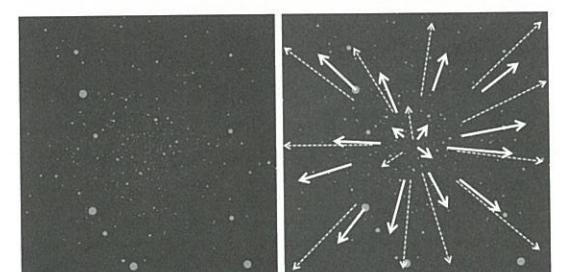


図2 左: 円形ランダムドット刺激の見え方の一例
右: ランダムドット刺激は2種類の速度のオプティカルフローとなるように放射運動をする。遅い速さのオプティカルフローを実線矢印、速い速さのオプティカルフローを点線矢印で示す。観察者の進行進路にはランダムドット刺激が存在しないよう描画される。二つのオプティカルフローの拡大の焦点(FOE)はディスプレイ画面中央に一致している。

の焦点(FOE)とディスプレイ画面中央は一致させた。また、ランダムドットの画面上のサイズをシミュレーションした距離での視角と一致させ、刺激はステレオ画像として呈示しているため、それぞれのオプティカルフローは実際の前進運動時の視覚刺激を忠実に再現することになる。ランダムドット刺激の平均輝度は $2.57\text{cd}/\text{m}^2$ 、背景の平均輝度は $0.61\text{cd}/\text{m}^2$ であった。刺激呈示持続時間は60sとした。

一つの刺激中で組み合わされる2種類のオプティカルフローの速さ条件は以下の3種類であった。

- (1) 12 m/sと24 m/s
- (2) 12 m/sと36 m/s
- (3) 6 m/sと48 m/s

実験で用いたランダムドット刺激は三次元空間内を運動する円形刺激を30fpsの動画として立体球面ディスプレイに呈示したものであり、放射状オプティカルフローの一つの速さにおいてシミュレートされる1フレーム当たりの刺激の三次元空間内での移動距離は一定である。今回実験に参加した被験者からは、オプティカルフローがすべて滑らかな放射運動に見えていたという内観を得ている。また、本研究で用いた刺激では放射状オプティカルフローが逆行して見えるといったことはなく、どのオプティカルフローも観察者の前進自己運動をシミュレートしたといえる。

実験では、2種類のオプティカルフローを与えるランダムドット刺激の空間分布密度比(%)を変数とした。それぞれのランダムドットの空間密度比を0~100%まで20%ずつ6段階で変化させた。空間分布密度比が100%または0%のときは1種類のオプティカルフローのみが呈示されることになる。1セッション内ではオプティカルフローの速さ条件は一定であり、6段階の異なる空間分布密度比をもつランダムドット刺激が各段階8回または10回ずつランダムな順序で呈示された。

被験者は1試行の刺激呈示後にベクションの速さのマグニチュード評価を行った。実験開始前に、参照条件として速い方のランダムドット刺激が100%であるオプティカルフローを3回呈示し、このとき知覚するベクションの速さを100とするように被験者に教示した。参照条件の呈示およびマグニチュード評価についての教示は1セッション中で半数の試行が終了したときにも再度行った。

被験者数は速さ条件(1)では11名、(2)では5名、(3)では10名であった。すべての条件で実験を行っ

た被験者が5名、速さ条件(1)と(3)で実験を行った被験者が5名。速度条件(1)のみ実験を行った被験者が1名となった。被験者の年齢は22~56歳(平均年齢28.1歳、男性9名、女性2名)であり、全員裸眼または矯正で視力は正常であった。

2) 結 果

実験後、各被験者にベクションの速さの評価について確認したところ、速さ条件(1)、(2)、(3)でそれぞれ1名がベクションの速さを評価せず、ベクションをどれだけ強く感じたかというベクションの強さを評価していることがわかった。この評価は本実験の教示とは異なっているので、以降はこれらの結果を省いて、結果の解析をすることにした。図3(a), (b), (c)にそれぞれ速さ条件(1), (2), (3)におけるベクションの速さ評価の結果を被験者別に示す。横軸はそれぞれの速さ条件で速い方のランダムドット刺激の空間分布密度比(%)、縦軸は被験者が応答したベクションの速さ評価の平均値を示す。各データ点には標準誤差が縦棒で示されている。図中の各データ点に沿って描かれている点線は横軸の0%と100%での2点を結んだ直線である。また、実線は後述する方法でデータ点にフィッティングした理論曲線である。

図3(a)より、速さ条件(1) 12m/s - 24m/sでは、ほぼすべての被験者で速い方のランダムドット刺激の空間分布密度比が増大するにつれて、被験者の知覚するベクションの速さは増加することがわかる。更に、各測定点は図中の点線とほとんど一致していることがわかる。これは、この2種類のランダムドットが混合した刺激に対して感じるベクションの速さは、それぞれのランダムドットのみを呈示したとき(空間密度比が0%と100%)に生じるベクションの速さに、空間密度比の重みを付けて線形に足し合わせた形で示されることを意味している。

図3(b)の速度条件(2) 12m/s - 36m/sでは、被験者TTとKSが線形足し合わせの傾向を示している。しかし、被験者DEとKYでは、ベクションの速さは線形足し合わせの点線から下方に外れている結果となっている。図3(c)の速さ条件(3) 6m/s - 48m/sでは、被験者TTのみが線形足し合わせの傾向を示している。ほかの被験者では、速さ条件(2)の被験者DE, KYと同様に、ベクションの速さは線形足し合わせの点線から下方に外れていることがわかる。

実験1では、2種類の速さをもつオプティカルフローが視野内に混在する場合、被験者が全体として感

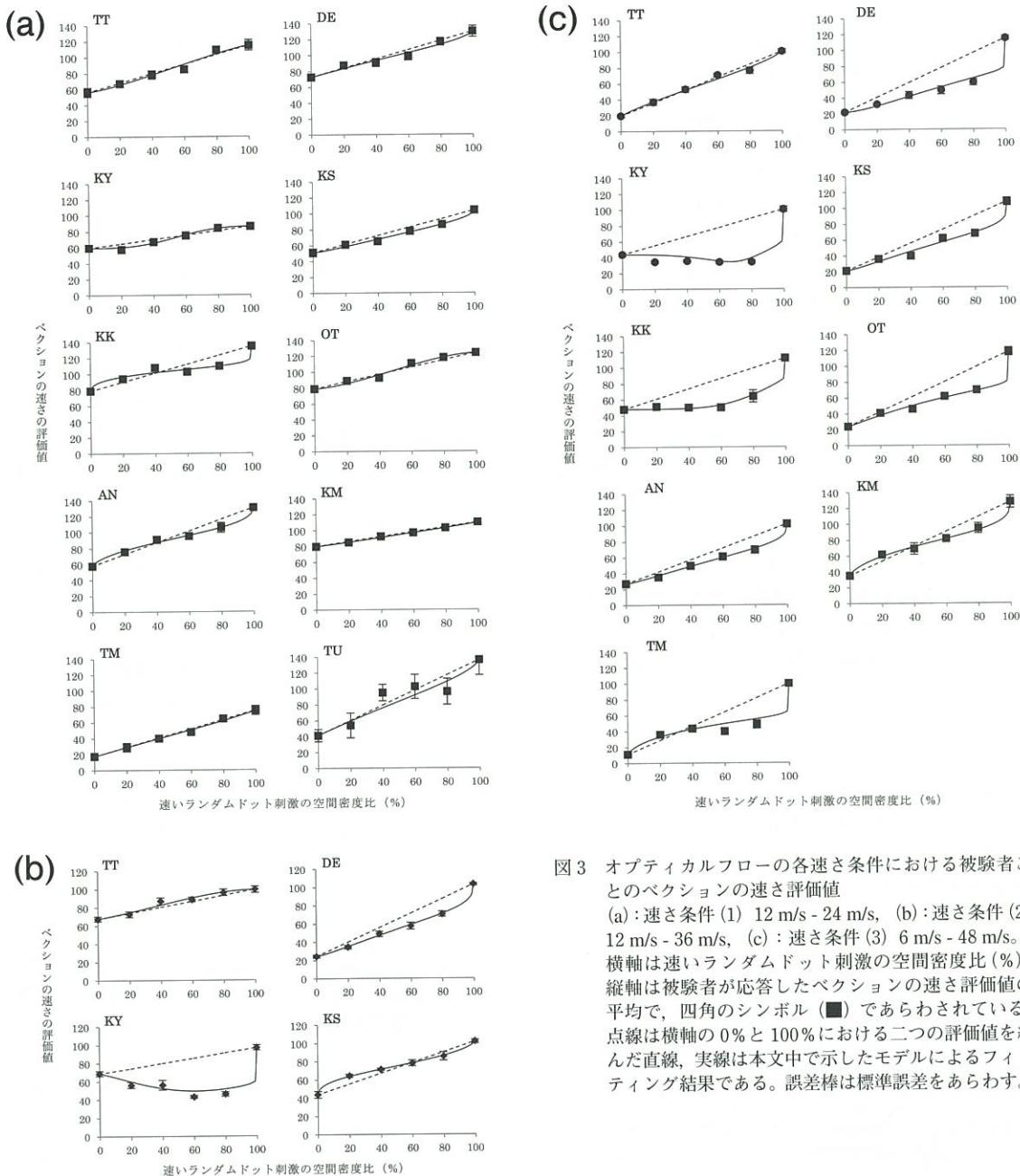


図3 オプティカルフローの各速さ条件における被験者ごとのベクションの速さ評価値
(a):速さ条件(1) 12 m/s - 24 m/s, (b):速さ条件(2) 12 m/s - 36 m/s, (c):速さ条件(3) 6 m/s - 48 m/s。
横軸は速いランダムドット刺激の空間密度比 (%), 縦軸は被験者が応答したベクションの速さ評価値の平均で、四角のシンボル (■) であらわされている。点線は横軸の0%と100%における二つの評価値を結んだ直線、実線は本文中に示したモデルによるフィッティング結果である。誤差棒は標準誤差をあらわす。

じるベクションの速さは、オプティカルフローの速さの差が小さい速さ条件(1)では、それぞれのオプティカルフローのみを示したときのベクションの速さの単純な密度比の重み付け足し合わせにはならないことが示された。そこで、それぞれのオプティカルフローのみを示したときのベクションの速さが空間密度比に対してどのように関係し、全体としてのベクションの速さが決まるのかをより詳細に明らかにするために、次のような足し合わせのモデル

ルを考えた。

ベクションの速さの評価値は

$$V = \left(\left(\frac{ara^n}{ra^n + rb^m} \right)^k + \left(\frac{brb^m}{ra^n + rb^m} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}$$

ここで、

a: 横軸=0% (遅いランダムドット刺激のみ) でのベクションの速さの評価値、
b: 横軸=100% (速いランダムドット刺激のみ)

でのベクションの速さの評価値、
 r_a : 遅いランダムドット刺激の空間分布密度比、
 r_b : 速いランダムドット刺激の空間分布密度比、

n: r_a に対する非線形係数、
m: r_b に対する非線形係数、
k: 足し合わせの非線形係数。

上記の式を用いて被験者ごとの評価値を最小二乗法によりフィッティングした曲線が図3中の実線である。そのときに得られた各係数の値を表1に示す。パラメータn, mは、全体としてのベクションの速さに対する、それぞれのオプティカルフローの寄与をあらわしている。nとmの比(n/m)が1に近い場合、ベクションの速さに対する二つのオプティカルフローの寄与は同程度であるといえる。とくに、n, mがともに1の場合、フィッティングは線形になる。パラメータkは二つのオプティカルフローからのベクションを統合する際の非線形性をあらわすが、速さ条件(2)と(3)の被験者KYに対してのみ導入し、そのほかの場合ではk=1とした。

速さ条件(1)では、ほぼすべての被験者でn/mは1に近い値をとり、ベクションの足し合わせがほぼ線

表1 本文中に示したモデル式を用いてベクションの速さ評価値をフィッティングしたときの被験者ごとの各係数の値

速さ条件(1) 12 m/s - 24 m/s

被験者	TT	DE	KY	KS	KK	OT	AN	KM	TM	TU
a	56.3	72.5	59.4	51	79	79	58	80	17.5	41.3
b	115	130	86.3	104	135	124	131	110	75	136.3
n	1.1	0.7	1.8	0.6	0.2	1.4	0.5	0.9	0.9	0.7
m	1.2	1.0	2.3	1.2	0.5	1.3	0.7	1.1	1.0	1.0
k	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

速さ条件(2) 12 m/s - 36 m/s

被験者	TT	DE	KY	KS
a	67.5	24.4	68.8	43.8
b	99.4	103	96.9	102
n	1.6	0.4	0.1	0.7
m	1.0	1.2	1.2	0.5
k	—	—	3.2	—

速さ条件(3) 6 m/s - 48 m/s

被験者	TT	DE	KY	KS	KK	OT	AN	KM	TM
a	19.4	21.9	43.8	21	48	24	27	35	11
b	101	115	101	108	112	118	102	128	100
n	0.8	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1
m	0.9	1.5	2.9	1.2	5.0	1.1	1.2	0.7	0.7
k	—	—	5	—	—	—	—	—	—

a: 横軸=0% (遅いランダムドット刺激のみ) でのベクションの速さの評価値、b: 横軸=100% (速いランダムドット刺激のみ) でのベクションの速さの評価値、n: 遅いランダムドット刺激の空間分布密度比に対する非線形係数、m: 速いランダムドット刺激の空間分布密度比に対する非線形係数、k: 足し合わせの非線形係数

形になっているという前述した結果を裏付けている。ただし、被験者 KY では、ベクションの速さ評価値の全体的な傾向は線形足し合わせに近い形になっているにもかかわらず、 n と m はほぼ 2 に近く、非線形足し合わせを示す値となっている。これは被験者 KY では、ベクションの速さに対して、横軸 r_b = 0~40% では遅いオプティカルフローの寄与が大きく、 r_b = 60~100% では逆に速いオプティカルフローの寄与が大きいという特性が示されているからである。

速さ条件 (2) では、被験者 TT と KS の n/m は 1 に近く、ほぼ線形足し合わせを示している。被験者 DE では、 $n < 1$, $m > 1$ となり、横軸 r_b の全域にわたって遅いオプティカルフローの寄与が大きいような非線形足し合わせ特性を示している。一方、被験者 KY では、 $n < 1$, $m > 1$ となり、更に足し合わせの非線形係数 k が導入されることで、遅いオプティカルフローの寄与が極めて大きいベクションの速さの特性を示す非線形曲線が得られている。

速さ条件 (3) では、被験者 TT は n/m が 1 に近く、線形足し合わせ特性を示しているが、被験者 DE, KY, KS, KK, OT, AN の 6 名の被験者では、 $n < 1$, $m > 1$ となり、横軸 r_b の全域にわたって遅いオプティカルフローの寄与が大きいような非線形足し合わせ特性を示している。被験者 KY では、速さ条件 (2) と同様に、遅いオプティカルフローの寄与が極めて大きいので、非線形足し合わせ係数 k を用いてフィッティング曲線が求められている。被験者 KM と TM では、 $n < 1$, $m < 1$, $n < m$ であり、横軸 r_b = 0~40% では速いオプティカルフローの寄与が大きく、 r_b = 60~100% では逆に遅いオプティカルフローの寄与が大きいという特性が示されている。

以上の結果をまとめると、本モデルは 2 種類のオプティカルフローの速さの差に伴う足し合わせ特性の違いをよくあらわしているといえる。速さの差が小さい場合は n/m が 1 に近く、ベクションの速さは 2 種類のランダムドット刺激の密度比の重み付きで線形に統合される。速さの差が大きくなると、 $n < 1$, $m > 1$ となる傾向があらわれ、ベクションの速さは遅いオプティカルフローが大きい寄与をもつ非線形足し合わせで統合される。

2 種類の速さのオプティカルフローが物理的に視野内に存在しても、両者の速さの差が小さい場合は、被験者には 1 種類のオプティカルフローとして見え、その速さは両者のランダムドット刺激の密度比に対する結果 (図 4(a)) では、ランダムドット刺激が 1 種

る線形和で決まり、また、両者の速さの差が大きい場合は、被験者には 2 種類のオプティカルフローが分離して見え、遅いオプティカルフローが静止外界環境として、速いオプティカルフローが自分に向かって来る物体の運動として見えてと考えられる。そこで、実験 2 では実験 1 で用いた 2 種類のランダムドット刺激の運動がどのように被験者に見えるか調べた。

3. 実験 2

1) 方 法

実験 2 では、実験 1 で用いた速さの異なる 2 種類のランダムドット刺激が被験者に一つのオプティカルフローに見えていたか、あるいは二つのオプティカルフローに見えていたかを明らかにする。ここではランダムドット刺激の運動の見えを調べるのが目的であるので、刺激呈示時間をベクションが生じない潜時時間内の 1 s とした。そのほかの刺激呈示条件は実験 1 と同様である。被験者は刺激呈示後にオプティカルフローが一つに見えていたか、二つに見えていたかを次の 4 段階で評価する。この評価値をここでは分離評価値と呼ぶ。

4: 二つに見える。

3: どちらかというと二つに見える。

2: どちらかというと一つに見える。

1: 一つに見える。

次に、被験者はランダムドット刺激の速さの評価をする。評価方法としては、実験 1 と同様に、速い方のランダムドット刺激の空間分布密度比が 100% である条件を参照条件とし、その速さを 100 とするようにした。オプティカルフローが二つに見えた場合には、被験者はそれぞれのランダムドット刺激に対して速さ評価をする。実験 1 と同様、1 セッション内の速さ条件は固定され、空間分布密度比の異なるランダムドット刺激が、被験者によって各刺激 8 回または 10 回ずつランダムな順序で呈示された。被験者は実験 1 の参加者のなかから、速さ条件 (1) と (3) では 9 名、速度条件 (2) では 4 名が参加した。

2) 結 果

図 4(a), (b), (c) にそれぞれ、速さ条件 (1), (2), (3) における分離評価値を示す。横軸が速いランダムドット刺激の空間密度比を示し、縦軸が分離評価値を示す。図中の円シンボルの大きさは対応する分離評価値の選択率の大きさをあらわす。速さ条件 (1) に対する結果 (図 4(a)) では、ランダムドット刺激が 1 種

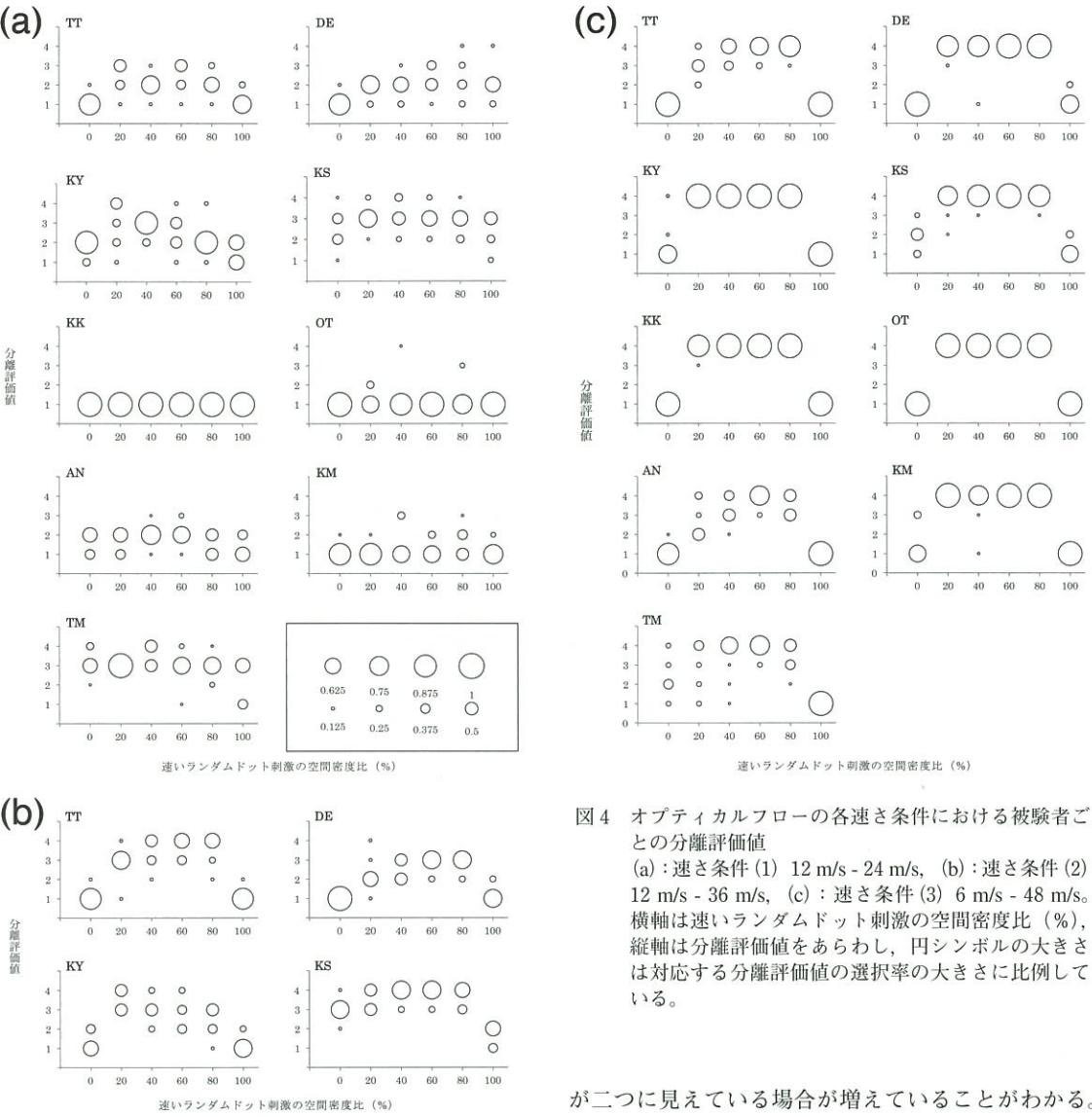
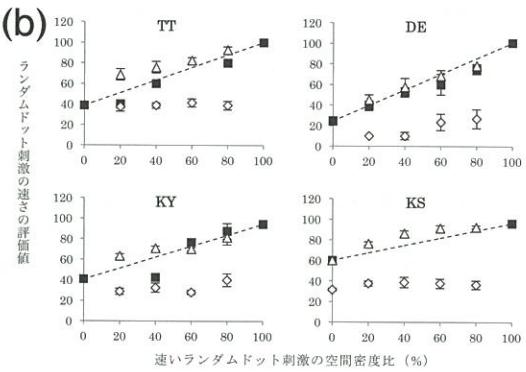
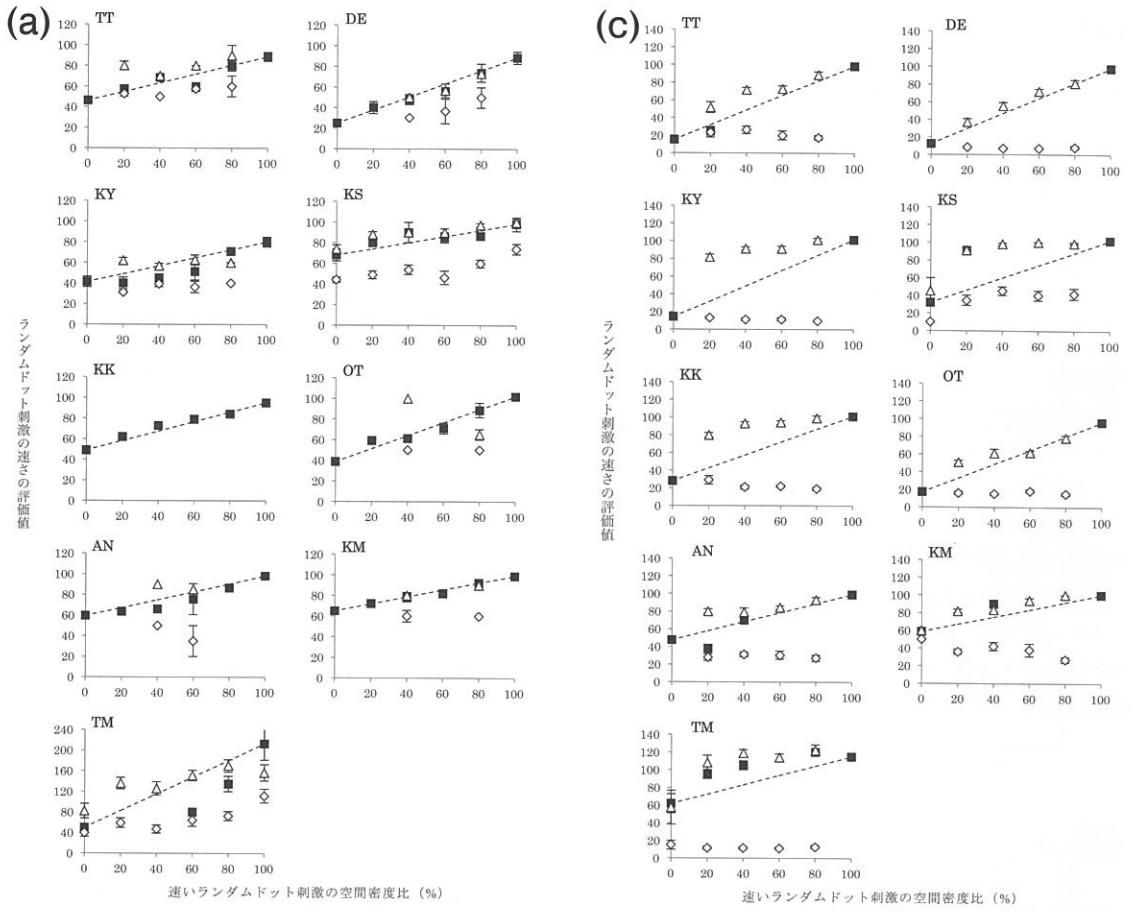


図 4 オプティカルフローの各速さ条件における被験者ごとの分離評価値
(a) : 速さ条件 (1) 12 m/s - 24 m/s, (b) : 速さ条件 (2) 12 m/s - 36 m/s, (c) : 速さ条件 (3) 6 m/s - 48 m/s。
横軸は速いランダムドット刺激の空間密度比 (%), 縦軸は分離評価値をあらわし、円シンボルの大きさは対応する分離評価値の選択率の大きさに比例している。

類の場合 (空間密度比が 0% または 100%) は、被験者 DE, KS, TM を除き、すべての被験者で分離評価値は 1 または 2 になり、オプティカルフローが一つに見えていることがわかる。しかし、2 種類のランダムドット刺激が視野内に混在する場合 (空間密度比が 20~80%) は、被験者 KK 以外では、分離評価値が 3 あるいは 4 になり、オプティカルフローが二つに見える場合があることがわかる。速さ条件 (2), (3) に対する結果 (図 4(b), (c)) では、多くの条件で分離評価値が 3 あるいは 4 になり、オプティカルフロー

が二つに見えている場合が増えていることがわかる。これは 2 種類のランダムドット刺激の速さの差が大きくなるとそれだけオプティカルフローが二つに分離して見えることを示している。

図 5(a), (b), (c) に速さ条件 (1), (2), (3) におけるランダムドット刺激の速さの評価値を示す。それぞれのパネル内にオプティカルフローが一つに見えていた場合 (分離評価値が 2 以下、黒シンボル) と二つに見えていた場合 (分離評価値が 3 以上、白シンボル) の結果の両方が示されているが、二つに見えていた場合では速いランダムドット刺激と遅いランダムドット刺激の速さ評価値はそれぞれ異なる形のシンボルで示されている。図中の点線は空間密度比が 0% と 100%



のときの速さ評価値を結んだ線形足し合わせの直線を示している。

オプティカルフローが一つに見えていた場合のランダムドット刺激の速さの評価は、図5(a)の被験者TMと図5(c)の被験者KSの各1点を除けば、すべての条件と被験者で点線にほぼ一致して線形に増加し

図5 オプティカルフローの各速さ条件における被験者ごとのランダムドット刺激の速さ評価値
 (a) : 速さ条件(1) 12 m/s - 24 m/s, (b) : 速さ条件(2) 12 m/s - 36 m/s, (c) : 速さ条件(3) 6 m/s - 48 m/s。横軸は速いランダムドット刺激の空間密度比 (%), 縦軸は被験者が応答したランダムドット刺激の速さの評価値の平均である。オプティカルフローの見え方によってランダムドット刺激の速さ評価値を異なったシンボルで示す。
 ■: オプティカルフローが一つに見えていた場合(分離評価値が2以下)。
 △: オプティカルフローが二つに見えていた場合の速いランダムドット刺激(分離評価値が3以上)。
 ◇: オプティカルフローが二つに見えていた場合の遅いランダムドット刺激(分離評価値が3以上)。点線はオプティカルフローが一つに見えていた場合の横軸の0%と100%における二つの評価値を結んだ直線である。誤差棒は標準誤差をあらわす。

ていることがわかる。したがって、オプティカルフローが一つに見える場合、その速さは2種類のラン

ダムドット刺激の速さをそれぞれの空間密度比の重み付けで平均した値で決まっているといえよう。オプティカルフローが二つに見えていた場合のランダムドット刺激の速さの評価は、遅いランダムドットと速いランダムドットに対して異なる傾向がみられた。遅いランダムドットの速さ評価は、図5(a), (b), (c)から、ランダムドット刺激の空間密度比によらずほぼ一定となっている。速いランダムドットの速さ評価は、ほとんどの場合(図5(c)の被験者KY, KS, KK以外)で、空間密度比の増加に伴って線形に増加している。

4. 考 按

本研究では、ベクション生起メカニズムの一端を明らかにするために、速さの異なる2種類のオプティカルフローを空間的に重ねて観察した際に、どのようなベクションが知覚されるかを調べた。実験1では、2種類のオプティカルフローの速さの差が小さい場合(図3(a))は、各オプティカルフローを単独で観察した際に知覚するベクションの速さを、各オプティカルフローを形成する刺激の空間密度比の重み付けて足し合わせた速さのベクションを知覚するという特性が得られた。また、2種類のオプティカルフローの速さの差が大きい場合(図3(b), (c))は、ほとんどの被験者において、知覚されるベクションの速さに對して遅いオプティカルフローが強い効果をもつ傾向があらわれていた。実験2では、2種類のオプティカルフローの速さの差が小さい条件(図4(a))では多くの場合でオプティカルフローは一つに見え、速さの差が大きい条件(図4(b), (c))では一つに見える場合が減少し、二つに見える場合が増大するという結果が得られた。一つに見える場合ではオプティカルフローの知覚される速さは、それぞれ単独のオプティカルフローの知覚的速さを各オプティカルフローの刺激の空間密度比の重み付けで足し合わせた速さになり、二つに見える場合では、遅いオプティカルフローの速さは、空間密度比によらず一定に知覚されるが、速いオプティカルフローの速さは、ほとんどの場合、空間密度比に對して線形に変化した。

ここでは、実験1のベクションの速さの評価と実験2のオプティカルフローの見えを比較し、それらの関係を考察する。まず、実験2のオプティカルフローの分離評価値がほとんどの空間密度比に對して2以下になり、2種類のオプティカルフローを一つに知

覚した場合(図4(a)の被験者TT, DE, KK, OT, AN, KM)を見る。この場合は、実験1のベクションの速さの評価値(図3(a))は空間密度比に對して線形に変化し、実験2の一つに見えていたオプティカルフローの速さ(図5(a))も線形に変化した。また、図4(c)のその他の被験者KY, KSおよび図4(b)の被験者DEでも、2種類のオプティカルフローを一つに知覚した場合は同様な結果の傾向があらわれている。したがって、これらの場合は、2種類のオプティカルフローから平均的な速さをもつオプティカルフローが一つ知覚され、そのオプティカルフローからベクションが生じていたと考えられる。この結果と同様に、刺激速度とベクション強度の関係を調べた過去の研究では、それらが線形な関係になることが示されている^{16, 18, 19)}。

次に、実験2でオプティカルフローの分離評価値がほとんどの空間密度比に對して3以上になり、オプティカルフローを二つに知覚した場合(図4(a)の被験者KY, KS, TM, 図4(b), (c)のすべての被験者)を見る。オプティカルフローが二つに分離して見えていたとき、もしどちらか一方のフローが静止外界環境と解釈されてベクションが生じるなら、ベクションの速さはどちらか一方のオプティカルフローの速さに一致すると考えられる。確かに、遅いオプティカルフローに一致してベクションの速さが決まっている場合(図3(b)の被験者KY, 図3(c)の被験者KYとKK), 速いオプティカルフローに一致してベクションの速さが決まっている場合(図3(a)の被験者KY, KS, TM, 図3(b)のTT, DE, KS, 図3(c)の被験者TT)が見られた。

しかし、一方、オプティカルフローが二つに分離して見ても、どちらか一方のオプティカルフローのみによってはベクションの速さが決まらない場合もあった。たとえば、図3(c)の被験者TT, KY, KK以外では、ベクションの速さは速いオプティカルフローとも遅いオプティカルフローともどちらにも必ずしも一致していない。この場合は二つのオプティカルフローのうち一方が静止外界環境になるのではなく、両方のオプティカルフローが統合してベクションの速さが決定されていたと考えられる。本実験の結果では、2種類のオプティカルフローの速さの差が大きく、両者が分離して見える場合、遅いオプティカルフローの寄与が大きいことが明らかとなった。これは、遅いオプティカルフローが静止外界環境として認識されやすい

ためであると考えられる。この理由の一つとして、我々が日常生活で経験するオプティカルフローの速さが関係していると考えられる。本実験に用いたオプティカルフローの速さは、6 m/s (21.6 km/h), 12 m/s (43.2 km/h), 24 m/s (86.4 km/h), 36 m/s (129.6 km/h), 48 m/s (172.8 km/h) であった。6~24 m/s は車の走行速度として日常生活でよく経験する速さだが、36 m/s と 48 m/s は経験する機会の非常に少ない速さである。この日常生活での経験の違いが静止外界環境の決定に影響していた可能性が考えられる。ベクションにおける前後の異方性を調べた過去研究では、異方性の原因としてオプティカルフローが日常生活で経験される頻度を挙げている³⁶⁾。本実験でも過去の研究と同様に、日常生活における経験頻度が静止外界環境の決定に影響することは十分考えられる。

刺激密度とベクションの関係について調べた過去研究^{11, 17)}では、視野に占める刺激の数がある一定以上になると誘導されるベクションの強さは一定になることが報告されている。本研究ではランダムドット刺激の数を1,000個一定にして実験を行ったが、ランダムドット刺激の総数を変えることで、今回とは異なるベクションの速さ特性が得られる可能性がある。たとえば、ランダムドット刺激の総数を多くすると、どちらか一方のオプティカルフローのみを呈示したときと同様のベクションがそのランダムドット刺激の空間密度比を小さくしても得られることがあり得るので、図3で示した特性が異なってあらわれるかもしれない。また、本実験で用いたランダムドット刺激の総数がある一定以上であったとすると、総数を少なくすることで、速さの差の大きい条件でも線形足し合わせ特性があらわれるかもしれない。いずれにしても、ランダムドット刺激の数がベクションの速さ知覚に与える影響についての実験は今後の課題である。

本実験の結果では、速さの差の小さい2種類のオプティカルフローを呈示した場合、それらの密度に応じて足し合わされた速さに基づくベクションが知覚される。言い換えると、遅いオプティカルフローのみを呈示した場合を基準として、速いオプティカルフローをそれに重畠して呈示すると、知覚するベクションの速さは増大するということである。これは、自動車運転時に道路上に運転者に向かって運動する刺激を呈示することで運転者の速さ感覚を上昇させた過去の研究³⁷⁾と一致している。この過去研究ではオプティカルフローとして自動車運転シミュレーション動画を用

い、本研究での遅いオプティカルフローとしては道路などの静止刺激が対応し、速いオプティカルフローとしては道路側面に設置した誘導刺激が対応している。この過去研究で用いた二つのオプティカルフローの速さの差の範囲は本研究とは異なっていること、また、この過去研究では誘導刺激は常に道路側面に設置され、本研究のように視野全体を覆う刺激ではないことなど、本研究とは刺激条件が異なっている。しかし、オプティカルフローとして本研究とは異なる自然な動画を用いた場合も二つのオプティカルフローが統合されベクションが生起することが示され、本研究結果の一般性が支持されているといえよう。

5. 結論

本研究では、2種類のオプティカルフローから自己運動が一意に決められない刺激条件におけるベクションの生起特性を調べた。オプティカルフローが一つに知覚されるときは、ベクションの速さはそれぞれのオプティカルフローを形成する刺激の空間密度比の重みでそれぞれの速さが線形に足し合わされた速さとなり、二つに分離して知覚されるときは、ベクションの速さはどちらか一方のオプティカルフローによって決まる場合と、遅いオプティカルフローの速さの寄与が大きいような統合特性で決まる場合があることが明らかになった。この結果より、ベクションの速さの評価値とランダムドット刺激の空間密度比の関係を示すモデル式を提案した。また、2種類のオプティカルフローの速さの差が大きいとき、遅いオプティカルフローにより強く依存してベクションが生起するのは、遅いオプティカルフローが静止外界環境として解釈されやすいためであると考察した。

文 献

- 1) 近江政雄：感覚・知覚の科学3. 内川恵二編, 179-203, 朝倉書店, 東京, 2008.
- 2) Warren WH: Perception of space and motion. In: Epstein W & Rogers S eds, Handbook of Perception and Cognition, 263-325, Academic Press, San Diego, 1995.
- 3) Johansson G: Studies on visual perception of locomotion. Perception 6: 365-376, 1977.
- 4) Kano C: The perception of self-motion induced by peripheral visual information in sitting and supine postures. Ecological Psychology 3: 241-252, 1991.
- 5) Nakamura S & Shimojo S: Critical role of foreground stimuli in perceiving visually induced self-motion (vection). Perception 28: 893-902, 1999.
- 6) Nakamura S & Shimojo S: A slowly moving foreground can capture an observer's self-motion—a report of a new motion illusion: Invertedvection. Vision Res 40: 2951-2923, 2000.
- 7) Ohmi M & Howard IP: Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display. Perception 17: 5-11, 1988.
- 8) Palmisano S: Perceiving self-motion in depth: The role of stereoscopic motion and changing-size cues. Percept Psychophys 58: 1168-1176, 1996.
- 9) Palmisano S, Gillam BJ & Blackburn SG: Global-perspective jitter improvesvection in central vision. Perception 29: 57-67, 2000.
- 10) Ito H & Shibata I: Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity. Vision Res 45: 397-402, 2005.
- 11) Brandt T, Wist ER & Dichgans J: Foreground and background in dynamic spatial orientation. Percept Psychophys 17: 497-503, 1975.
- 12) Held R, Dichgans J & Bauer J: Characteristics of moving visual scenes influencing spatial orientation. Vision Res 15: 357-365, 1975.
- 13) Andersen GJ: Perception of self-motion: Psychological and computational approaches. Psychol Bull 99: 52-65, 1986.
- 14) Berthoz A, Parvad B & Young LR: Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual vestibular interactions. Exp Brain Res 23: 471-489, 1975.
- 15) Lestienne F, Soechting J & Berthoz A: Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. Exp Brain Res 28: 363-384, 1977.
- 16) Brandt T, Dichgans J & Koneig E: Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. Exp Brain Res 16: 476-491, 1973.
- 17) Dichgans J & Brandt T: Perception, Handbook of Sensory Physiology. In: Held R, Leibowitz H & Teuber H eds, 755-804, Springer, Berlin, 1978.
- 18) Sauvan XM & Bonnet C: Properties of curvilinearvection. Percept Psychophys 53: 429-435, 1993.
- 19) de Graaf B, Wertheim AH et al: Angular velocity, not temporal frequency determines circularvection. Vision Res 30: 637-646, 1990.
- 20) Andersen GJ & Braunstein ML: Induced self-motion in central vision. J Exp Psychol Hum Percept Perform 11: 122-132, 1985.
- 21) Sauvan XM & Bonnet C: Spatiotemporal boundaries of linearvection. Percept Psychophys 57: 898-904, 1995.
- 22) Bonnet C & Chaudagne N: Comparison of contrast thresholds for object-motion and for self-motion in different directions. Exp Brain Res 36: R6, 1979.
- 23) Palmisano S & Gillam B: Stimulus eccentricity and spatial frequency interact to determine circularvection. Perception 27: 1067-1077, 1998.
- 24) Bonato F & Bubka A: Chromaticity, spatial complexity, and self-motion. Perception 35: 53-64, 2006.
- 25) Seno T, Sunaga S & Ito H: Inhibition ofvection by red. Percept Psychophys 72: 1642-1653, 2010.
- 26) Nakamura S, Seno T et al: Coherent modulation of stimulus colour can affect visually induced self-motion. Perception 39: 1579-1590, 2010.
- 27) Seno T, Nakamura S et al: Static visual components without depth modulation alter the strength ofvection. Vision Res 50: 1972-1981, 2010.
- 28) Seno T, Ito H & Sunaga S: The object background hypothesis forvection. Vision Res 49: 2973-2982, 2009.
- 29) Howard IP & Childerson L: The contribution of motion, the visual frame, and visual polarity to sensations of body tilt. Perception 23: 753-762, 1994.
- 30) Howard IP & Heckmann T: Circularvection as a function of the relative sizes, distances, and positions of two competing visual displays. Perception 18: 657-665, 1989.
- 31) Ohmi M, Howard IP & Landolt JP: Circularvection as a function of foreground-background relationships. Perception 16: 17-22, 1987.
- 32) Telford L, Spratley J & Frost BJ: Linearvection in the central visual field facilitated by kinetic depth cues. Perception 21: 337-349, 1992.
- 33) Post RB: Circularvection is independent of stimulus eccentricity. Perception 17: 737-744, 1988.
- 34) Nakamura S: Effects of stimulus eccentricity onvection reevaluated with a binocularly defined depth. Japanese Psychological Research 50: 77-86, 2008.
- 35) Kitazaki M & Sato T: Attentional modulation of self-motion perception. Perception 32: 475-484, 2003.
- 36) Bubka A, Bonato F & Palmisano S: Expanding and contracting optic-flow patterns andvection. Perception 37: 704-711, 2008.
- 37) 川島祐貴, 内川恵二他：道路側面に設置された点滅柱状物体により生起する視覚誘導自己運動感覚を交通工学的に応用した自動車運転者の速度感覚変化手法. 映像情報メディア学会誌 65 : 833-840, 2011.