

ベクトル加算演算と広視野運動知覚

Linear Integration Properties of the Perception of Motion Aftereffect
Caused by Wide-field Transparent Visual Flow

樋田栄揮, 横堀喬祐, 相原威

Eiki Hida Kyousuke Yokobori Takeshi Aihara

玉川大学工学部ソフトウェアサイエンス学科
194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1
Faculty of Engineering, Tamagawa University
6-1-1 Tamagawagakuen, Machida-shi, Tokyo 194-8610

Abstract

We investigated motion integration properties of the perception of motion aftereffect caused by wide-field transparent visual flow. Adapting stimulus composed of random dot patterns was presented to human observers to examine both direction and duration of motion aftereffect(MAE). For unidirectional motion, perceived duration of MAE depended on the speed of adapting stimulus. Transparent visual stimulus in the multiple directions induced motion aftereffect with unidirectional percept. Perceived direction depended on the speed of coherent motion in the transparent visual flow. Direction of motion aftereffect suggested linear integration mechanism of transparent flows by weighted summation of each coherent motion in the visual stimulus.

Keywords: Wide-field Visual Flow, Transparent Motion, Multiple directions, Motion Aftereffect, Integration of Motion, Vector Summation

1. はじめに

われわれが日常経験する視覚運動には、外界に存在する物体の運動である局所運動と自己の移動などに伴って生ずる広視野運動とがある¹⁾。このうち広視野運動は、3次元空間上に展開する外界を把握し、自身の運動方向を正しく認識して自己運動の制御を行うためには必要不可欠なものである¹⁾。

眼の最内層に存在する網膜に映し出された外

界の映像から、どのような過程を経て広視野運動情報が検出されるかについては、その主要な脳内情報処理経路が知られている。すなわち、網膜で電気信号に変換された視覚情報は、後頭葉のV1野へと投射される。ここで運動情報の最初の運動検出がなされたあと、視覚連合野に位置するMT野で局所運動の検出²⁾、続いてMST野においては広視野運動の情報検出がなされる^{2, 3, 4)}。すなわち、広視野運動情報が抽出される

ためには、何段階にもわたる情報の統合が必須となる⁴⁾。しかし、運動情報の統合はMT野からMST野に至る段階での情報処理で終結したわけではない。たとえば、視野上に多数の広視野運動が存在する場合には何らかの情報統合が必要であるが^{5,6)}、どのような性質の情報統合であるのかについてはいまだ明らかになっていない。

本研究では、広視野運動情報の統合の性質について、ヒトを対象とした心理物理学の実験により調べていきたい。そのために、情報統合の特性を解析するのに適している運動残効知覚に着目した。

運動残効とは、一定方向の運動刺激を一定時間見続けたあと静止パターンに目を移したとき、静止しているものがゆっくりと動くように見える知覚現象である^{6,7,8,9)} (図1)。このように知覚特性に変化をもたらす運動刺激を順応刺激と呼ぶ。2つの並進運動パターンが異なる方向に運動するような順応刺激(重畳運動刺激)を与えた時の運動残効の知覚方向は、2つの並進運動のベクトル加算方向の逆方向であることが知られている^{6,7,9,10,11)}。したがって、運動残効の方向は、呈示された複数の運動パターンの情報が統合された結果を示すことになる。

2. 目的

本研究では、視野上に複数の広視野運動刺激

が重畳するとき、どのような運動情報の統合が存在するかを、ヒトの運動残効知覚特性を解析することにより考察した。特に、異なるスピードと方向を有する独立した並進運動からなる重畳運動刺激パターンに対して、各パターンの運動方向がベクトル加算的に統合されているのか否かについて詳細に検討することにした。そして、広視野運動情報が脳内でどのように情報表現されているかについても考察した。

3. 実験方法

以下に示す実験は、成人男性4名の被験者を対象とした。実験に使用される順応刺激およびテスト刺激に関しては、VisualCとOpenGLを用いて作成し、それらの刺激パターンを被験者の前面に配置したディスプレイに呈示した。刺激パターンの視野角は $67^{\circ} \times 52^{\circ}$ とした。

実験1：1方向広視野運動刺激による運動残効のスピード依存性

順応刺激パターンは一方向に並進運動するランダムドットパターンとした(図1)。画面内のドット数は100個とし、順応刺激のスピードは $4.0^{\circ}/\text{sec}$ から $48.0^{\circ}/\text{sec}$ まで5段階に設定した。

30秒間順応刺激パターンを呈示したのちテスト刺激パターン(静止パターン)を呈示し、被験者は知覚された運動残効の持続時間と運動方向を回答した。

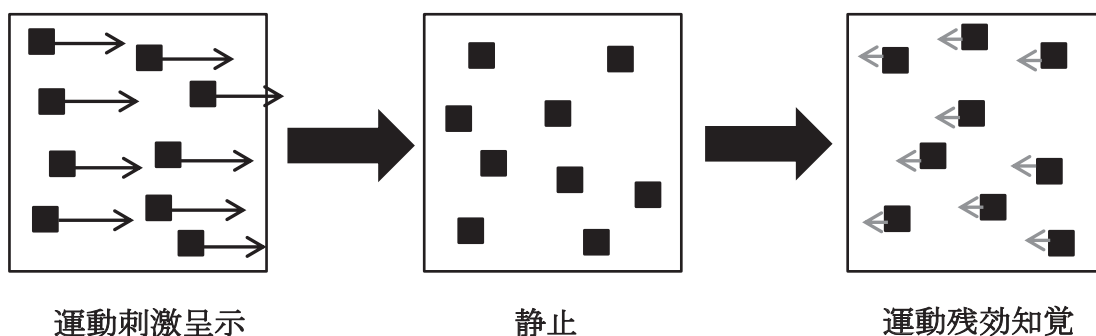


図1 運動残効の説明図

実験 2: 2 方向広視野重畳運動刺激による運動残効特性

順応刺激パターンは 2 群の独立した並進運動からなる重畳刺激パターンである (図 2)。刺激パターンのドット数は各運動群について 100 個ずつとした。各運動群のスピードは $8.0^\circ / \text{sec}$ と $32.0^\circ / \text{sec}$ のうちどちらかを選択し、2 群のスピードが同一の場合と、一方が速く他方が遅い場合とを設定した。また、重畳刺激を構成する並進運動の方向は右方向と上方向に定めた。

被験者には 30 秒間順応刺激を与えた後、静止パターンを呈示して知覚された運動残効の方向と持続時間を回答してもらった。

実験 3: 3 方向重畳広視野運動刺激による運動残効特性

順応刺激パターンは 3 群の独立した並進運動からなる重畳運動パターンである (図 3)。刺激パターンを構成するドット数は各運動群につき 100 個ずつとした。各運動群のスピードは実験 2 と同様、 $8.0^\circ / \text{sec}$ と $32.0^\circ / \text{sec}$ のうちのどちらかを選択した。また、3 群の並進運動の運動方向については、図 3 に示す 3 種類の組み合わせとした。実験 1 と同様に、被験者には 30 秒間順応

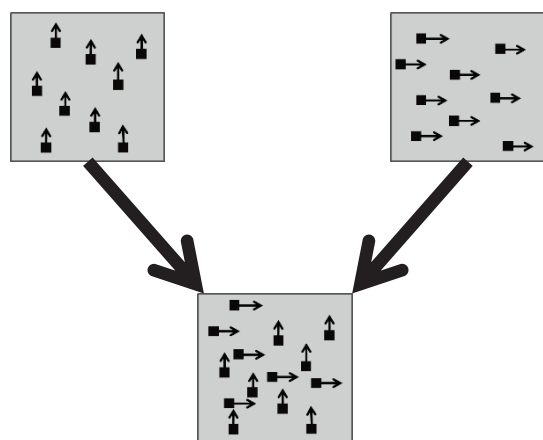


図 2 2 方向重畳運動の説明図

刺激を与えた後、静止パターンを呈示して知覚された運動残効の方向と持続時間を回答してもらった。

実験 4: コヒーレント値の異なる 3 方向重畳広視野運動刺激による運動残効特性

順応刺激を構成する 3 群の並進運動のうち、ひとつの並進運動のコヒーレント値を 0.1 から 0.8 まで 8 段階に設定した。コヒーレント値とは一定方向に運動する並進運動の中で一定方向に運動するドットの割合を示す。たとえば、パターンを構成するドット数が 100 個あり、このパターンのコヒーレント値が 0.5 の場合には、100 個のドットのうち 50 個が一定方向へ運動するが、他の 50 個はそれぞれが他のドットとは独立にランダムな方向へと運動することをあらわしている。したがって、並進運動パターンのコヒーレント値が大きいくほど一定方向への運動成分が多いため、被験者にはより強い運動知覚をもたらすことになる。

順応刺激を構成する他の 2 群の並進運動についてはすべてのドットが一定方向へ動く、すなわちコヒーレント値が 1.0 の並進運動とした。

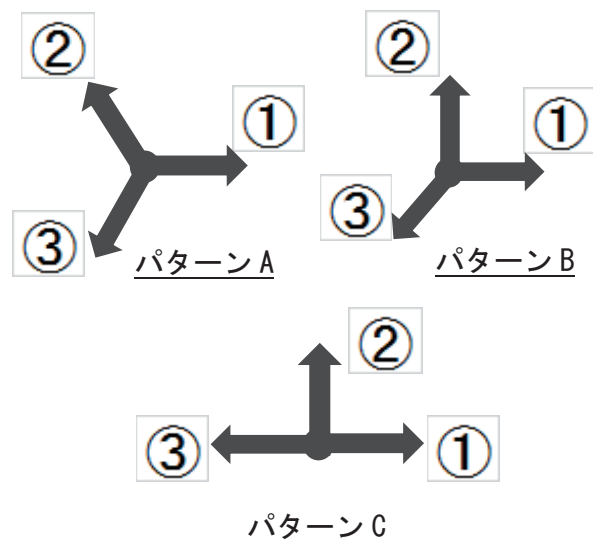


図 3 実験に使用した運動パターン

上記のような順応刺激を30秒間被験者に呈示した。その後で静止パターンを呈示して知覚される運動残効の方向と持続時間を調べた。

4. 実験結果と考察

実験1:1 方向広視野運動刺激による運動残効の速度依存性

1 方向の広視野運動刺激（順応刺激）による運動残効の方向は、順応刺激の逆方向であった。また、運動残効の持続時間は順応刺激の速度によって異なることが判明した。その結果を図4に示す。グラフは被験者4名の平均値で示してある。順応刺激速度が $4.0^{\circ}/\text{sec}$ のときには、持続時間は5.5秒であるが、順応刺激の速度が $8.0^{\circ}/\text{sec}$ では、持続時間は7.0秒に増加した。速度を $16^{\circ}/\text{sec}$ まで上げると、持続時間は4.4秒まで減少し、さらに速度を上げた場合には、持続時間は徐々に減少する傾向にあった。すなわち、運動残効の持続時間は $8.0^{\circ}/\text{sec}$ の順応刺激で最大値を示した。

運動残効の持続時間が長いのは、順応刺激がより強い残効効果を与えたからだと解釈できる。したがって、図4に示す結果は、遅く動くパターンの方がより強い運動残効をもたらすことを示している。なぜ遅い運動パターンの方がより

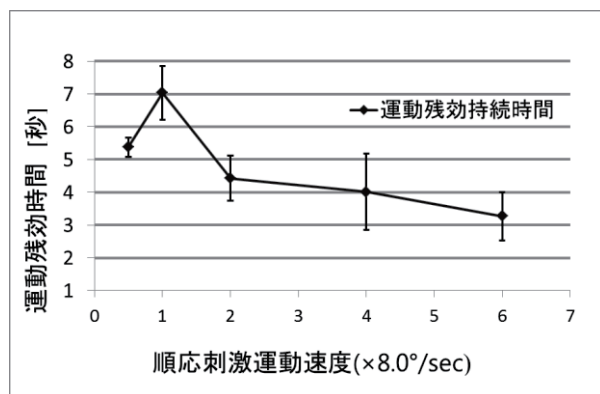


図4 順応刺激速度と運動残効持続時間

強い運動残効を生ずるのかについて、次の理由が考えられる。すなわち、運動残効は極めてゆっくりした運動知覚であり、このような運動感覚は遅い速度を最適速度としている方向選択性細胞が担っていると考えられる。したがって、遅い順応刺激は遅い運動をコーディングする細胞の感度をより低下させるがために、遅い順応刺激による運動残効時間は、より長くなるのではないかと考えられる。

以下の実験では、このような運動残効の順応刺激速度依存性を考慮しながら順応刺激を選択した。

実験2:2 方向広視野重畳運動刺激による運動残効特性

最初に、2方向重畳運動を構成する並進運動の速度が同一の場合を検討した。すなわち、並進運動の速度の組み合わせとしては、両並進運動ともに $8.0^{\circ}/\text{sec}$ の場合と $16.0^{\circ}/\text{sec}$ の場合について実験を行った。結果を図5に示す。この図では、右方向への並進運動（速度 $8.0^{\circ}/\text{sec}$ ）と上方向への並進運動（速度 $8.0^{\circ}/\text{sec}$ ）

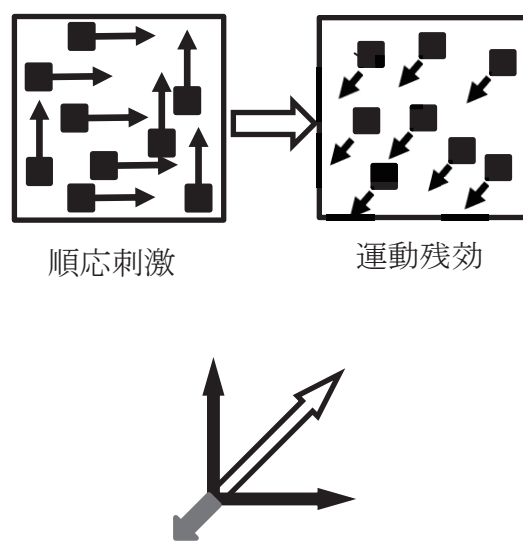


図5 2方向重畳運動刺激と運動残効

/sec) が画面上に重畳している。これらの運動ベクトルを加算したものが図5下の白抜きベクトルであるが、運動残効の方向は白抜きベクトルの逆方向であった(灰色ベクトル)。両並進運動のスピードが 16.0° の場合にも、速度ベクトルを加算すると右上 45° 方向となるが、運動残効の方向は左下 45° 方向、すなわち、加算ベクトルの逆方向にあらわれた。

これらの結果は、2つの並進運動のスピードが同一の場合には、2つの並進運動が同時に呈示されたとき、両運動のベクトル加算統合がおこなわれることを示している。

つぎに、一方が 16.0° /sec、他方は 32.0° /sec で運動する並進運動の運動残効の結果は、図6のようなベクトル図となった。図中、2つの並進運動ベクトルは黒ベクトルで、それらの加算ベクトルは白抜きベクトルで表示されている。このとき灰色ベクトルで表示される運動残効の方向は、加算ベクトルの逆方向に生じた。したがって、運動残効持続時間がほぼ同一の場合には、2つの並進運動に対してスピード情報も含めたベクトル統合処理が行われると考えられる。

さらに、一方のスピードが 8.0° /sec、他方が 16.0° /sec の場合を検討した。この条件は、並進運動のスピード比としては先ほどと同様 1:2 であるが、図4に示すように、 8.0° /sec の並進運

動は 16.0° の並進運動よりも 1.5 倍ほど運動残効持続時間が長い。この場合にも先ほどと同様、図6のようなベクトル加算が成立するかを検討した。被験者4名ともにほぼ同様の結果となったが、図7はその中の代表例を示したものである。図中、白抜きベクトルは2つの並進運動ベクトルを加算したものであるが、運動残効の方向(灰色ベクトル)は下向きに近い 250° 方向となった。この方向は加算方向の逆方向からは大きく外れている。それでは、知覚された運動残効の方向は、2つの運動ベクトルをどのように統合すれば得られるのであろうか。

ここで運動残効持続時間の長い運動刺激の方が運動残効に対する寄与が大きいと考え、その運動ベクトルの長さを調整し(重みづけを行い)、実際よりも長いベクトルで表示する。このベクトルと他方のベクトルとを加算し、その逆方向を調べると、ほぼ実際の運動残効の方向と一致した。以上の考察より、並進運動ベクトルを運動方向とスピードをあらわすものと捉えるのではなく、運動残効の持続時間の長さを運動残効への寄与の大きさと考え、それをベクトルの長さで解釈する。そうすれば、2方向重畳刺激による運動残効の方向は、重みづけをおこなった2つの並進運動ベクトルの統合方向の逆方向にあらわれると考えることができる。

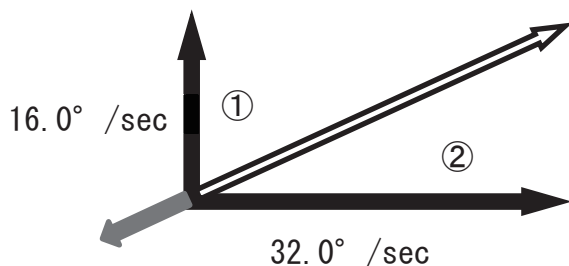


図6 2方向重畳刺激と運動残効

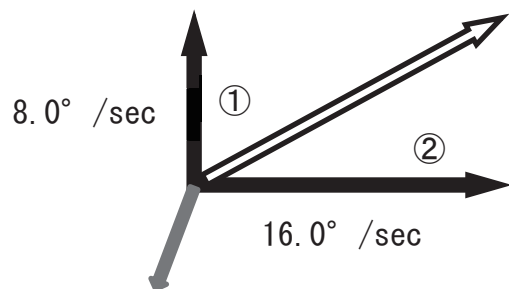


図7 2方向重畳刺激と運動残効

実験 3:3 方向重畳広視野運動刺激による運動残効特性

実験に用いた 3 方向重畳運動刺激の方向の組み合わせは、図 3 のパターン A、パターン B、およびパターン C とした。

パターン A を構成する並進運動のスピードが同一の場合は、どのスピードを用いても運動残効はあらわれなかった。パターン A では 3 方向それぞれのスピードが同一、すなわち、ベクトルの長さが同一の場合には、3 つのベクトルを加算すればゼロになる。したがって、運動残効が知覚されないのは、重畳刺激を構成する 3 つの運動情報を正確にベクトル加算統合しているからではないかと考えられる。

次に、パターン A において、並進運動①のスピードを $8^\circ/\text{sec}$ 、並進運動②と並進運動③のスピードを $40^\circ/\text{sec}$ とした時の運動残効の方向は、図 8 の灰色ベクトルで示す方向となった。すなわち、運動残効は遅いスピードで動く並進運動①の逆方向にあらわれた。この結果は、図 8 左に示す速度ベクトル加算図からは再現できない。しかし、並進運動①の運動残効時間が長いことを考慮して並進運動①のベクトルに重み付けをおこない、再度 3 つのベクトルを加算してみると、運動残効ベクトルの逆ベクトルとなること

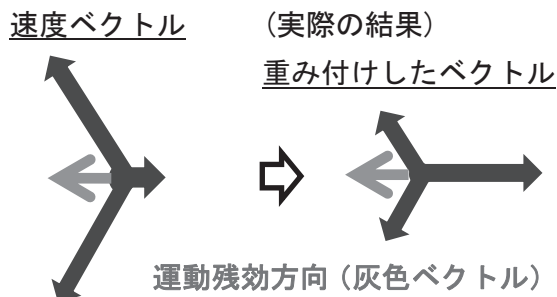


図 8 3 方向重畳運動と運動残効

がわかった (図 8 右)。すなわち、3 方向の並進運動に対しても 2 方向重畳並進運動のときと同様、多方向並進運動情報のベクトル加算統合がおこなわれることを示している。

次にパターン B についても、ベクトル加算統合が成立しているかを調べた。パターン B の 3 つの並進運動のスピードは同一とし、運動方向は図 9 に示す方向とした。このとき、運動残効の方向はほぼ左下 225° の方向であった (図 9 の灰色ベクトル)。重畳運動を構成する 3 つの並進運動ベクトル (大きき $|\vec{v}|$) を加算するとベクトルの長さは $(\sqrt{2}-1)|\vec{v}|$ となり、ベクトルの方向は 45° 方向となる。このベクトルの逆ベクトル方向は左下 225° 方向であり運動残効の方向と一致する。したがって、パターン B についてもベクトル加算が成立していると考えられる。

最後にパターン C について調べたが、予想通り、運動残効の方向は並進運動②の逆方向であった。パターン C では並進運動①と並進運動③は互いに逆方向に運動するため、運動ベクトルを加算すればゼロとなる。したがって、運動残効に寄与するのは並進運動②となるため、運動残効の方向は、並進運動②の逆方向となる。

最後にパターン C について調べたが、予想通り、運動残効の方向は並進運動②の逆方向であった。パターン C では並進運動①と並進運動③は互いに逆方向に運動するため、運動ベクトルを加算すればゼロとなる。したがって、運動残効に寄与するのは並進運動②となるため、運動残効の方向は、並進運動②の逆方向となる。

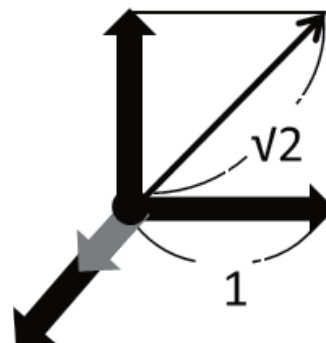


図 9 3 方向重畳運動と運動残効

実験 4: コヒーレント値の異なる 3 方向重畳広視野運動刺激による運動残効特性

実験 3 において、パターン A を構成する並進運動のスピードが同一の場合には、運動残効は生じなかった。その理由は、3 つの並進運動ベクトルを加算するとゼロになるからであった。もし、3 つの並進運動がベクトル加算統合されるのであれば、3 方向並進運動のうちの 1 つが他の 2 つの運動よりも運動成分量が少ない場合には、運動成分量の少ない運動は、ベクトルの大きさが他の 2 つより小さくなると考えられる。したがって、3 つの運動ベクトルを加算してもゼロにはならず、そのために、運動成分量の小さい運動方向への運動残効が知覚されると予測される。

実験 4 では、この予測を検証するために、パターン A を構成する並進運動のうち、並進運動②と③はコヒーレント値が 1.0、すなわち、すべてのドットが一定方向へと運動するが、並進運動①のコヒーレント値は、0.1 から 1.0 まで段階的にかえていった。また、3 つの並進運動のスピードはすべて $48^\circ / \text{sec}$ とした。

このときに知覚された運動残効の持続時間を図 10 に示す。並進運動①のコヒーレント値が 0.1、すなわち、100 個のドットのうち 10 個のみが右方向に移動する場合には、2.6 秒の運動残効持続時間を示したが、並進運動①のコヒーレント値

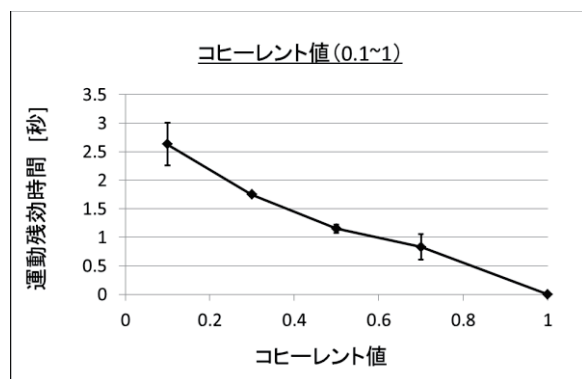


図 10 並進運動の運動成分量と運動残効持続時間

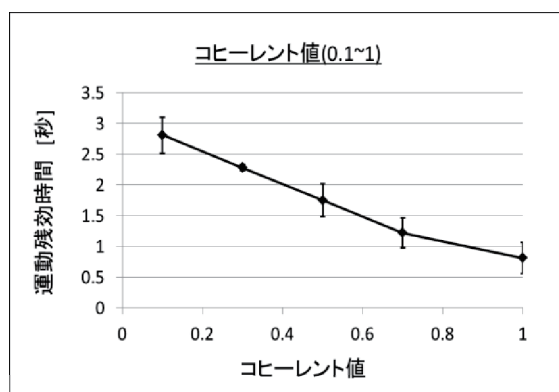


図 11 並進運動の運動成分量と運動残効持続時間

を大きくして一定方向への運動成分量を増やすと運動残効持続時間は減少し、コヒーレント 1.0、すなわち、3 つの並進運動を構成するそれぞれのドットがすべて与えられた方向へと並進運動する場合には、予測どおり運動残効は知覚されなくなった。

次に、同様の実験をパターン B (図 3) に対して行った。このパターンは、パターン A とは異なり、3 つの並進運動がコヒーレント値 1.0 であっても、運動残効が生ずる (図 9)。したがって、パターン B の並進運動②におけるコヒーレント値を段階的に増加させて最大値 1.0 としても運動残効が残ると考えられる。この予測を確認するために、運動残効並進運動②のコヒーレント値を 0.1 から 1.0 まで段階的にかえていった。また、3 つの並進運動のスピードは $48^\circ / \text{sec}$ とした。図 11 に示す結果を見ると、パターン A のときと同様、並進運動②のコヒーレント値が増加するにつれて運動残効持続時間は短くなっていくが、コヒーレント値 1.0、すなわち、並進運動②のドットがすべて同一方向に動いても 0.8 秒程度の運動残効が知覚された。したがって、パターン B を用いた実験結果も 3 つの並進運動がベクトル加算統合されることを支持している。

今回の研究結果は、スピードと運動方向の異なる並進運動が存在するとき、各運動をあらわ

す運動ベクトルに対して、運動残効に及ぼす大きさを重みを付けた後、各運動ベクトルを加算し、その逆方向を求めれば運動残効の方向となることを示している。このことは、広視野運動情報の検出に重要な役割を果たしている MST 野において、方向選択性細胞による方向情報の表現⁶⁾だけではなく、スピード選択性を持つ細胞のスピード情報の表現¹²⁾も運動残効認知に用いられていることを示唆している。

5. おわりに

本研究では、テスト刺激として静止刺激を用いて運動残効特性を調べた。テスト刺激としてダイナミックランダムパターンと呼ばれるすべてのドットがランダムな方向に動くパターン使用したときには、今回とは異なる方向への運動残効知覚が考えられる^{11,13)}。テストパターンに依存した広視野運動残効知覚が、MST 野における広視野運動情報表現とどのように関連しているかを検討するのが今後の課題である。

参考文献

- 1) Smith, A.T. and Snowden, R.J. Visual Detection of Motion, Academic Press (1994)
- 2) Rodman H.R. and Albright T.D. Single-unit analysis of pattern-motion selective properties in the middle temporal visual area(MT). *Exp. Brain Res.* 75(1989) ,53-64
- 3) Zeki, S.M. Uniformity and diversity of structure and function of rhesus monkey prestriate visual cortex., *J. Physiol.*, 277 (1978), 273-290
- 4) Saito, H.A., Yukiie, M., Tanaka, K., Hikosaka, K., Fukada., Y., and Iwai., E., Integration of direction signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey., *J. Neurophysiol.* 6(1986) ,145-157.
- 5) Treue, S. Hol., K., and Rauber H.-J., Seeing

multiple directions of motion-physiology and psychophysics., *Nature Neuroscience* 3 (2000), 270-276

- 6) Saito, H.A., Hida, E., Amari, S. Ohno H., and Hashimoto., N., Neural population representation hypothesis of visual flow and its illusory aftereffect in the brain:psychophysics, neurophysiology and computational approaches., *Cogn. Neurodyn.* 6(2012), 169-183
- 7) Mather, G., *The Motion Aftereffect: A Modern Perspective*, MIT Press (1998)
- 8) Sutherland, N.S., Figural aftereffects and apparent size. *Q. J. Exp. Psychol.* 13 (1961), 222-228
- 9) Mather, G., Pavan, A., Campana, G.,and Casco,C., The motion aftereffect reloaded, *Trends in Cognitive Science*, 12(2008), 481-487
- 10) De Grind, W.A. Movement Aftereffect of bi-vectorial transparent motion. *Vision Res.* 39,(1994), 349-358
- 11) Verstraten, F.A.J. , van der Smagt, M.J., Fredericksen, R.E., and van de Grind., W.A., Integration of after adaptation to transparent motion: Static and dynamic test patterns result in different aftereffect directions. *Vision Res.* 34(1999), 803-810
- 12) Pribe, N.J., Cassanello, C.R., and Lisberger, S.G., The neural representation of speed in macaque area MT/V5. *J/ Neurosci.* 23(2003),5650-5661
- 13) Alais, D., Verstraten, F.A.J .and Burr, D.C. The motion aftereffect of transparent motion: Two temporal channels account for perceived direction., *Vision Res.* 45(2005) ,403-412

2016年3月17日原稿受付, 2016年3月30日採録決定
Received, March 17, 2016; accepted, March 30, 2016