

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23243076

研究課題名(和文) 順応による知覚的世界の適応的変容

研究課題名(英文) Adaptive changes appearing as aftereffects of visual adaptation

研究代表者

伊藤 裕之 (Ito, Hiroyuki)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40243977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、視知覚の様々な側面における順応と残効を調べた。たとえば、残像の形成、順応による形の知覚的变化、錯視的運動にあらわれる運動残効などである。我々は、残像は網膜上の光受容器の疲労パターンそのものではなく、脳活動を表すことを残像の形の変化から見出した。そして残像が現れたり消えたりするのは、脳内での視覚的要素間の相互抑制によることを発見した。また、運動残効の実験により、オプアートの見られる流れの錯視が、相対運動の検出によって決定されていることを示した。さらに、繰り返される動きに対するサッカードの学習についても調べた。これらの結果は、順応と残効がいかに脳の活動を知るのに有効かを証明している。

研究成果の概要(英文)：Adaptation and aftereffect in various aspects of visual perception were studied, e.g., appearance of afterimages, perceptual shape changes after adaptation, motion aftereffects of illusory motion. We have found that afterimages are not simple fatigue of photo receptors on the retina but reflections of brain activities. Perceptual shapes of afterimages are sometimes different from adapted shapes. The afterimages repeat appearing, disappearing and reappearing. We found that this is caused by mutual inhibition between basic visual elements, such as combinations of color and orientation. By measuring adaptation and aftereffect, we have revealed that illusory flow perception arising in an op art painting is determined by relative motion detection mechanisms. We also investigated learning in saccades while viewing a repeated motion sequence that caused position illusions. The results of these experiments show the effectiveness of adaptation and aftereffects to study brain activities.

研究分野：実験心理学

キーワード：視覚 知覚 順応 残効 残像 運動 眼球運動 錯視

1. 研究開始当初の背景

我々の視知覚研究グループでは、近年、運動知覚を中心にして、順応や残効、学習を伴う視覚現象を研究してきた。実験心理学の分野では、順応と残効を用いて処理過程を調べる手法は古くからあるが、近年発見された現象にもなお、この手法は有効である。我々の研究グループが発見した現象等を主な題材にして視覚情報処理の段階を順応と残効の手法により切り分けることを試みた。

2. 研究の目的

本研究では、順応や残効を手法として用いることにより、さまざまな視覚現象の処理過程を解明することにあつた。時間スケールや、両眼間転移等の変数によりその処理レベルを調べた。特に錯視を利用した順応の実験が本研究の特徴である。代表的な研究対象は以下のものであつた。

(1) 形の知覚と残像の特性

円は周辺視で凝視すると、数秒で角張って見えてくる。このとき円を消失させると残像が見える。この形態知覚の順応を調べることにより曲線と角の形の処理過程を明らかにし、この残像の特性を調べることにより、従来網膜上の生理学的飽和と考えられてきた残像の特性を調べることができる。この現象の両眼間転移を測ることにより、形の処理の両眼性について調べることができる。

(2) 残像の消失と復元

残像は見えていても数秒で知覚的に消失し、その後瞬き等のきっかけで再び見ることがある。また、静止網膜像の実験と同様に、順応した後、図形の一部だけが残像として見えたり、見える部分が入れ替わったりといった現象が生じる。この原因を組織的に調査することにより、残像の見えを起す脳のメカニズムが処理のまとまり単位で相互抑制をしていることを示すことができる。

(3) 局所的運動と相対運動の検出

相対運動は、局所的運動が検出された後に空間的に対比が起こることにより検出されると考えられる。op artであるEnigmaは、図の中央を凝視すると、その円環上をさらさらと何か流れる錯視が生じる。この現象の生起過程を順応と残効を用いて解明し、同時に運動処理過程における局所運動と相対運動の検出についての関係を明らかにすることができる。

(4) 眼球運動の学習

Flash Glove 錯視を利用して、サッカード眼球運動の学習について検討する。この錯視においては、短時間提示される棒状の刺激の位置が、物理的には同じであるのに、往復運動する背景の動きによって大きく異なって見える。このとき、短時間提示刺激をサッカードを用いて追わせると、刺激は物理的に同じ位置での点滅であるのに対して、錯覚によ

りずれた位置に現れるように見えるため、錯視による位置のずれに対してサッカードが起こるかどうかを調べる。刺激全体が繰り返し運動であるため、学習が生じ、サッカードは実際に刺激が出る前に予期的な動きをする可能性があるが、錯視に対してもこれが生じるかどうか調べる。

3. 研究の方法

(1) 形の知覚と残像の特性

A. 円をちりばめたディスプレイを 10 秒間観察させ、消失した際に見える残像の形に最も近いものを 83 人の被験者に選ばせた。同様に、六角形をちりばめたディスプレイを観察させた際に生じる残像の形に、最も近いものと同じ被験者に選ばせた(図 1)。

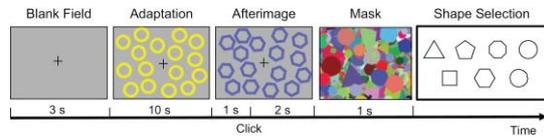


図 1. 実験手順 1

B. 網膜上での刺激の露出を同じ形にするために、円形を少し中心からずらして回転させた図形と六角形を回転させた図形を 93 人の被験者に観察させた後、知覚された残像の形に最も近いものを選ばせた。

C. 円や六角形の形への順応が両眼間転移を起すかどうか、残像の形の見えによって調べた。右眼に円形を提示し、左眼に回転する円や回転する六角形を提示し、その後、右眼に見える残像の形の丸みを、44 人の被験者が評定した。

(2) 残像の消失と復元

水平線と垂直線でできた格子を順応刺激として 7 人の被験者に 10 秒間観察させ、その残像を調べた。見えている残像が垂直線であるか水平線であるか、両方であるか、ボタン押しで 10 秒間に渡って調べた(図 2)。計 140 試行のボタン押しを加算することにより、それぞれの残像がどのように移り変わっているかをグラフ化した。垂直線と水平線が同色である場合、異なる色でできている場合を比較した。また、方位が単一であっても線が重ならない場合や、方位が異なっても空間的位置が異なる場合の残像の見えを比較した。

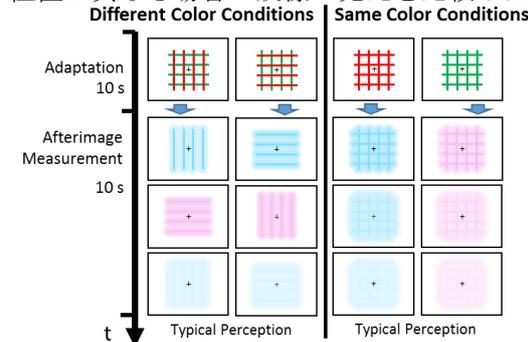


図 2. 実験手順 2

### (3) 局所的運動と相対運動の検出

被験者は、図3の Enigma 刺激の中央部を凝視した。刺激は5秒間または10秒間、時計回りまたは反時計回りに回転した(順応)後、停止した。

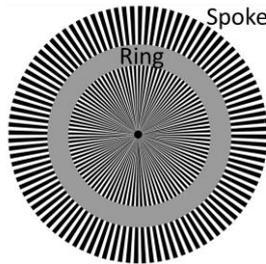


図3. Enigma を模した刺激

図3の spoke の部分の見えの運動方向と ring 中の錯覚による流れの知覚の運動方向について、回転中と10秒間の停止期間(残効)にボタン押しを行うことによって測定した。7人がそれぞれの条件で10試行ずつ行った結果を、時計回転をマイナス、反時計回転をプラスの符号として条件ごとに集計した。

さらに順応期間中の相対運動の有無の効果を調べるため、ring 上にランダムドットを配置し、順応期間中に spoke と同方向、反対方向、静止の3条件で提示した。

#### (4) 眼球運動の学習

コンピュータの画面上に、2段階のグレーの輝度による縞を等速度で往復運動させて提示した。その運動方向が逆転する瞬間に棒状の刺激を短時間重ねて提示した。棒状の刺激は切り替わった後の運動方向にずれて現れたように見える錯覚を起こし、実際には同一の位置で点滅しているのに、左右にずれた位置で交互に現れるように見えた。被験者はこれを眼で追うよう指示された。

また、錯視を打ち消すように、物理的にずれた位置に提示した棒状刺激についても眼で追うように指示された。物理的なずれの量は被験者個人ごとに測定され、設定された。

被験者の眼の動きは、眼鏡型眼球運動測定装置によってモニタされた。

## 4. 研究成果

### (1) 形の知覚と残像の特性

図4左に示すように、円に順応した後に見えた残像は、塗りつぶした円では六角形、輪郭による円では六角形と八角形を選んだ人数が多かった。逆に、六角形に順応した後に見えた残像は、六角形と円の両方に答えが分かれた。消えた直後に六角形に見え、すぐに円に変形する場合もあった。

この結果は、次のことを示している。a. 残像の見えの形は順応刺激の形とは必ずしも一致しない。つまり網膜上の光受容器の疲労パターンがそのまま残像として現れているわけではない。b. 円への順応が多角形の残像を

作り、多角形への順応がしばしば円形の残像を作ることから、脳における形への順応、特に曲線と角への順応が残像の中に残効として現れている。c. 曲線と角の検出は相互抑制の関係にある。

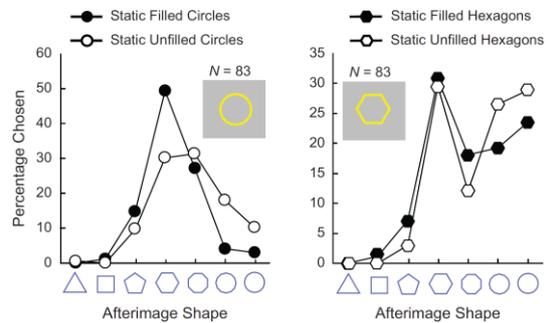


図4. 静止した円と六角形の残像の形

次に、順応期間中の網膜への露出を同じにした動的刺激の結果を示す(図5)。左右ともに回転する刺激であり網膜上では円形の疲労パターンが生じる。右図のように六角形を回転させた順応刺激は、網膜上の刺激提示領域の形通りほぼ全員円形の残像を知覚している。しかし、左図のように円を回転させた場合は残像の形はほぼ六角形に見えており、順応中に網膜を刺激した領域の形に関わらず、刺激の形そのものに影響を受けていることがわかる。つまり六角形の回転は、円形の網膜疲労を作るが、その残像は図3左の静止した円形の残像のように六角形にはならず、円形となる。回転する円形は、静止した円形よりもはっきりと六角形の残像をつくった。これらのことから、残像の形は、網膜上の疲労のパターンとは関係なく、どのような図形を眺めていたか、によって決まることがわかった。

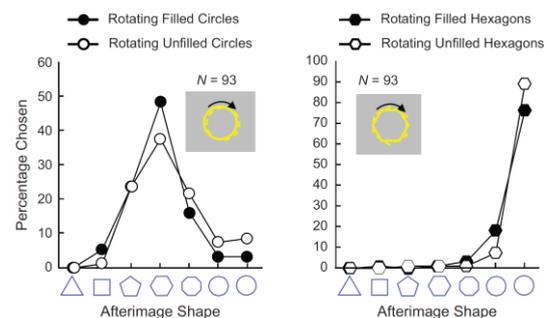


図5. 回転刺激による残像の形成

これらの実験の結果から、脳における曲線と角の検出過程は相互抑制的であると結論できる。つまり図6のように、一方の形態の検出の疲労が、他方の形態を残像の中に生み出すのである。

さらに、これらの抑制が視覚システムのどこで起こっているかを示す両眼間転移の結果を図7に示す。縦軸は右眼の残像の丸みの評定値である。10は完全な円、0は完全な多角形を表す。右眼の順応は常に円によって

起こるが、左眼の順応が回転する円の場合は、右眼の残像が角張って見え、左眼の順応が回転する六角形の場合は、右眼の残像は丸く見えた。このことは形への順応が両眼を超えて残像の見えの形に影響することを示し、曲線と角の検出が両眼からの情報の統合後に起こることを示す。

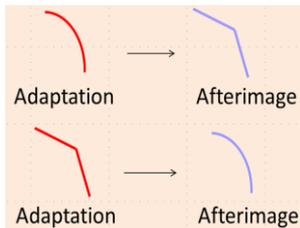


図 6. 曲線と角の相互抑制モデル

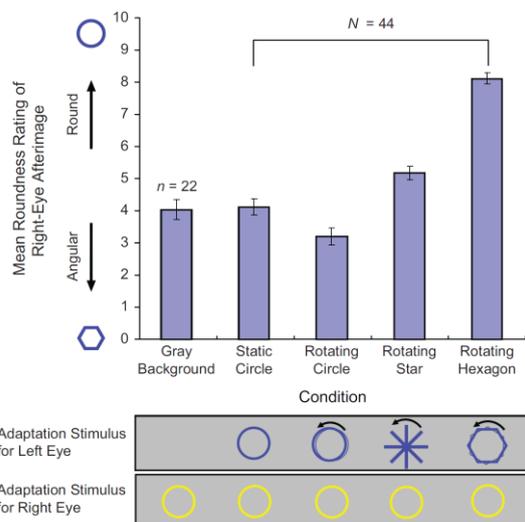


図 7. 曲線、角への順応の両眼間転移

### (2) 残像の消失と復元

図 8 に縦線と横線の 10 秒間に渡る残像出現率の推移を示す。左図は縦線と横線が赤と緑の異なる色の組み合わせとなっている刺激で、右図は縦線と横線が共に赤または共に緑の刺激の結果である。黒の線は縦線と横線が共に残像として見えている状態である。右図の同色条件では、残像が消失するまでほとんどの時間、両方の線が見えていたが、左図の異色条件では、5 秒くらいで縦か横の一方の線が残像として見える割合が多くなるのがわかる。これは、残像が消失する過程で縦線と横線の残像の見えが相互に抑制しているものとみなすことができる。つまり異なる色と方位の組み合わせが残像の見えの分解と一方の消失を生じさせると考えられる。

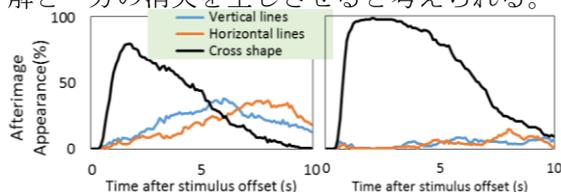


図 8. 縦線と横線の残像出現率

上記の相互抑制は、縦線と横線の空間的な

重なりがない場合は生じないことが図 9 から明らかである。縦線と横線を凝視点の左右に提示して順応した場合、同色条件、異色条件ともほとんど結果は変わらず、両方の残像は見え続けた。

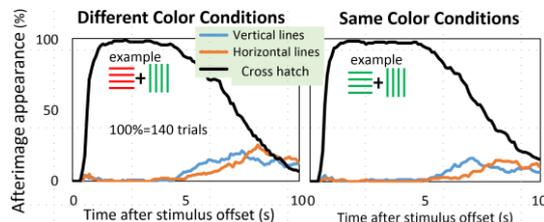


図 9. 空間的重なりがない条件

さらに縦線のみで空間的に接触がない条件においても、図 10 のように色の違いによる残像の相互抑制はみられなかった。

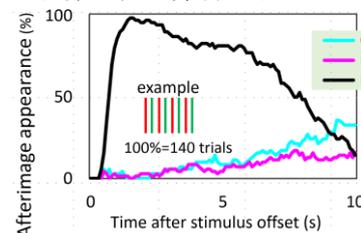


図 10. 異色同方位条件

これらの結果から、残像は色と方位を組み合わせた段階で、消失と出現の単位となり、空間的に重なっていれば、それぞれの組み合わせ間に相互抑制が働くと考えられる。

### (3) 局所的運動と相対運動の検出

Enigma 刺激は回転させると、spoke 部分は運動方向と垂直な縞となるため、強い局所的運動が生じる。図 11 は、spoke と ring 内の錯視の動きの知覚的運動方向を示したもので、それぞれのグラフの上半分は反時計回りが優勢、下半分は時計回りが優勢であることを示す。図 11 下のグラフの左側に示すように、回転を始めるとその方向への spoke の運動知覚が生じ、回転停止後（点線より右）では、その運動残効により、それまでとは反対方向の動きの知覚が生じる。一方、ring 上の錯視の流れについては、刺激図形が回転すると、その反対方向への流れの知覚が生じ（図 11 上の左）、停止後（点線より右）には、それまでの回転方向と同方向の流れの知覚が生じた。これは同時に、回転中と停止後には spoke の知覚的動きと反対方向へ錯視の流れが生じたということである。

この結果は、ring 上の流れの錯視は、spoke の知覚的運動と対比されていることを示しており、流れの錯視は spoke との相対運動として知覚されているということである。

図 12 は相対運動検出器のモデルを Enigma 刺激に適用したものである。相対運動検出器は、中心部の動きが周辺部の動きと反対方向のときに最もよく応答する検出器と

して想定される。周辺部を spoke が刺激し、相対運動検出器が応答することにより、中心部は反対方向に動いていると仮定されることになり、錯視の動きが生じると思われる。

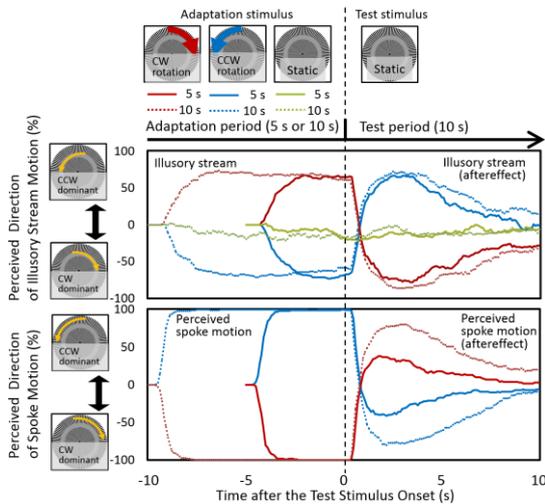


図 1.1. Enigma 刺激の回転と ring 内の錯視的運動 (上図) および spoke の運動の知覚

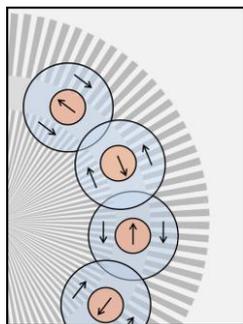


図 1.2. 相対運動検出器モデル

図 1.3 はこのモデルを検証するために、順応期間中の ring にテクスチャをつけて回転させた結果を示している。

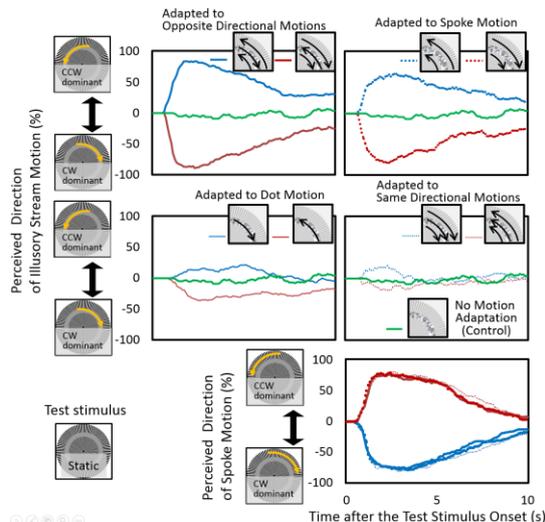


図 1.3. 相対運動の強弱と ring 内錯視的運動の残効の関係

順応中に ring 部分が spoke と逆方向に動いた場合、停止後の錯視的流れは最も強い残

効を示した (左上)。次に、順応中に ring 部が静止していた条件 (右上) においても強い残効が生じた。逆に、順応中に ring と spoke が同方向に回転した場合 (右中段)、停止後には錯視的流れの残効はほとんど現れなかった。一方、spoke 部分の運動残効は条件にかかわらず、同様に生じた。つまり、spoke 部分は条件によらず局所的運動の順応による運動残効を起こしたが、ring 部分は、順応中に spoke 部分と相対運動があった場合のみ、残効として錯視的流れの運動方向の偏りを示した。これらの結果は、図 1.2 の相対運動検出器モデルによる Enigma 錯視の動きの見えるの説明を支持するものである。

#### (4) 眼球運動の学習

図 1.4 は 1 サイクルの刺激提示時間の眼球運動の軌跡を、55 回分重ね書きしたものである。実際には緑と赤の棒は同じ位置に出現するが、図の点線部のように左右にずれた位置に見える。眼球運動は、背景の縞の動きに対して追従眼球運動を起こしサイン波成分の軌跡を残すが、それぞれの棒の提示後、次の棒の提示前にサッカードが生じている。このサッカードは、棒の出現に対して追従的に起こったものではない。サッカードの方向は、錯視によってずれて見えた方向にではなく反対方向に起こる。つまり、次に現れるであろう棒の、錯視によりずれた位置の予測に対する期待によって誤ったサッカードが生じているものと考えられる。

この結果から、繰り返し運動に対する学習による予測的サッカードは、錯視によって位置がずれたように見える場合にも、網膜上の位置のずれではなく、錯視にしたがった位置に生じることがわかる。

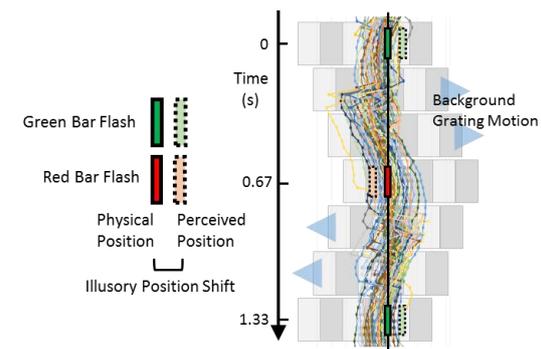


図 1.4. 眼球運動の軌跡

#### (4) その他の視覚現象および方法論的研究

<動く残像> 残像は通常、静止した順応刺激を見た後に生じるが、運動する刺激を見た後には、動く残像を見ることができた。色のあるテクスチャのついた太い輪郭の円を回転させ、それを 10 秒間観察させた。その図形の消失後、その色の補色の残像が現れたが、(1) の実験で示されたように、多角形の残像が現れ、それが順応期間と逆方向に回転す

るのが知覚された。

<主観的輪郭の残像> カニツツア型の主観的輪郭は、中央が背景より明るく見え、その残像はやや周囲より暗く見える。この残像の暗さが、錯視的明るさに対する残効なのか、残像によって生じる明るさの反転したカニツツア型の主観的輪郭なのかを検討した。その結果、主観的輪郭の明るさに対する残像ではなく、主観的輪郭を構成する要素の残像によって生じる、明るさの反転した新たな主観的輪郭であることがわかった。

バザルリ錯視によって生じる主観的明るさについては、その残像に明白な残効が現れた(図15)。

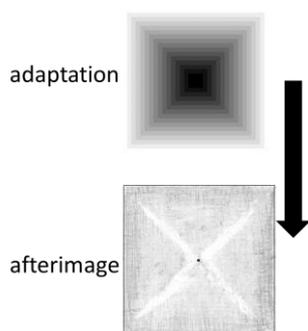


図15. バザルリ錯視とその残像

<新しい運動残効の形態>

テクスチャのある、ゆっくりと回転する対象を見ているとき、突然そのテクスチャをランダムに変更すると、その対象はそれまでの動きとは反対方向に急速に回転して見える。これは運動残効の新しい現れ方と考えられる。この現象については、挑戦的萌芽研究「瞬目時における眼と脳の機能的連携」として展開した。

<新しい運動錯視>放射線状のパタンの中央に円盤を置くと、眼の動きと同方向に円盤が動いて見える錯視を発見した(図16)。この錯視は、相対運動の検出、残像等の現象が関連していると考えられる。

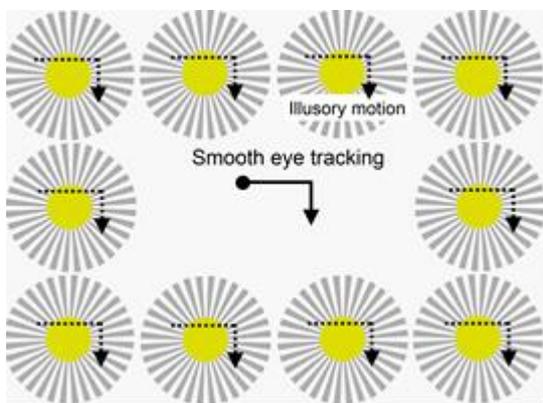


図16. 追従眼球運動追従錯視

<有機ELディスプレイの視覚実験への適用>

照明等に活用される有機ELを使ったディスプレイが入手可能になり、これまで液晶デ

ィスプレーでは難しくCRTディスプレイではできなかったタイプの視覚刺激の提示が再び可能になると考えられた。その実験機器としての特性を多視点から検討し、輝度、色度、コントラスト、時間特性等、ほとんどの点で液晶ディスプレイを凌駕し、視覚実験に適した精度をもつことを確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

1. Ito, H. (2012) Cortical Shape Adaptation Transforms a Circle Into a Hexagon: A Novel Afterimage Illusion. *Psychological Science*, 23, 2, 126-132
2. Ito, H. (2012) Illusory object motion in the centre of a radial pattern: The Pursuit-Pursuing illusion, *i-Perception*, 3, 1, 59-87
3. Wexler, M, Glennerster, A, Cavanagh, P, Ito, H., Seno, T. (2013) Default perception of high speed motion, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 17, 7080-7085
4. Ito, H., Ogawa, M., Sunaga, S. (2013) Evaluation of an organic light-emitting diode display for precise visual stimulation, *Journal of Vision*, 13, 7, 1-21

[学会発表] (計17件)

1. Ito, H. (2015) Illusions appearing in aftereffects, Tokyo Symposium on Optical Illusion

[図書] (計1件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.design.kyushu-u.ac.jp/~ito/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 裕之 (ITO, Hiroyuki)

九州大学・大学院芸術工学研究院・教授

研究者番号：40243977

### (2) 研究分担者

須長 正治 (SUNAGA, Shoji)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号：60294998

レメイユン ジェラード バスチアン

(Remijn, Gerard B.)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号：40467098