

【研究ノート】

中村錯視は網膜神経節パラソル細胞の一過性
反応に起因するのか

Cavanagh & Anstis 説と Ashida & Scott-Samuel 説の
比較検討

中 村 浩
川 部 大 輔

研究ノート

中村錯視は網膜神経節パラソル細胞の一過性反応に起因するのか Cavanagh & Anstis 説と Ashida & Scott-Samuel 説の比較検討

中 村 浩 川 部 大 輔
Ko NAKAMURA Daisuke KAWABE

目次

1. 序論
2. Cavanagh & Anstis (1986) による説明
3. Cavanagh & Anstis 説検証のための実験観察 1
4. Cavanagh & Anstis 説検証のための実験観察 2
5. 考察
6. Ashida & Scott-Samuel (2014) による説明
7. 総合考察

1. 序論

中村錯視 (Ashida & Scott-Samuel, 2014) (※注1) とは、明るさの変化勾配を持つ図形の配列をその変化勾配に沿って動かした時、動く方向によって個々の図形および背景を含めた図形全体の明るさが実際とは異なって知覚されるという現象である。具体的な図形の配列は Fig.1 に示すとおりで、それぞれの楕円図形 (上下7.8mm、左右12mm) の明るさには直線的勾配があり、左端は白 (#FFFFFF) で、右端は黒 (#000000)、背景は白 (#FFFFFF) に設定されている。これを Fig.2 に示すように図全体の上半分を左方向へ、下半分を右方向へ動かした時、実際の両領域の平均輝度に違いがないにもかかわらず、上半分は暗く、下半分は明るく知覚される。各楕円図形自体の内部の明るさが上半分と下半分では異なって知覚されるが、それと同時にその背景の白部分においても同様

の明るさの違いが知覚される。この現象は Fig.3 に示すように楕円図形を取り巻く背景を黒 (#000000) に設定しても楕円図形自体の明るさが異なって知覚されるため、背景が白の時とほぼ同様の明るさ錯視が認められる。

この現象に対する説明原理は Cavanagh & Anstis (1986) および Ashida & Scott-Samuel (2014) によるものが考えられるが、本研究ではこれらの説明原理を実際の錯視現象に適用しながらそれぞれの妥当性について検討する。

2. Cavanagh & Anstis (1986) による説明

Cavanagh & Anstis (1986) は、Fig.4 に示す図形を用いて中村錯視同様の現象が生じることを報告しており、その理由として輝度変化勾配に対する網膜神経節細胞 y 細胞 (パラソ

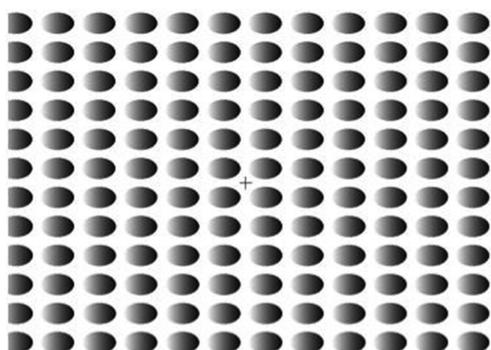


Fig.1 中村錯視図形(背景白条件) 水平に輝度変化勾配を持つ楕円図形を図のように配置し、図形全体を左方向へ動かせば、全体の明るさは暗くなり、逆に右方向へ動かせば全体の明るさは明るく知覚される。

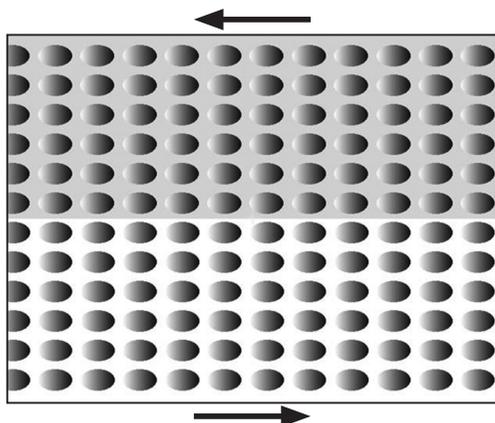


Fig.2 中村錯視 画面全体に配置された楕円図形の上半分を左方向へ、下半分を右方向へ運動させると、下半分比べて上半分の楕円図形を中心に全体的に明るさが低下して知覚される。

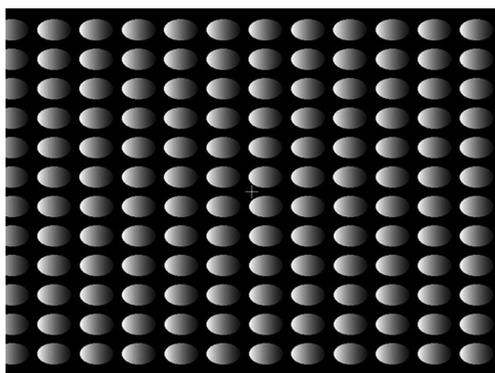


Fig.3 明るさの勾配をもつ楕円を配置した図の背景を黒にしても運動の方向による明るさ錯視は認められる。

ル細胞)の一過性反応を指摘している(※注2)。網膜神経節細胞のパラソル細胞は一過性(transient)反応を示し、ミジェット細胞は持続的(sustained)反応を示すことが知られているが(Mather, 2009)、彼らは、特に一過性反応を示すパラソル細胞の輝度変化勾配に対する非直線的反応に起因すると指摘している。すなわち一過性反応は反応が持続しないため、急激な明るさ変化に反応が対応できず、飽和状態となり、その結果実際の明るさ変化と反応の間のギャップが大きくなると考えた。ミジェット細胞の反応は持続的であるため、実際の明るさの変化に対応した反応が生じ、この二種類の細胞の反応を合成したものが最終的な反応の強さとなって明るさ知覚のエラーを引き起こす原因となっていると説明している。

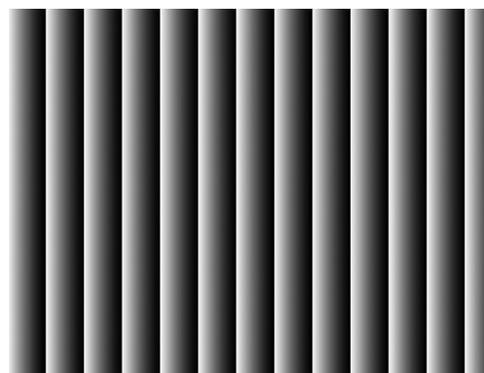


Fig.4 Cavanagh & Anstis (1986) によって用いられた刺激図
中村錯視同様、図の上半分を左へ、下半分を右方向へ動かすと上半分が暗く知覚される。

この考えに従って背景が白の場合、網膜上の一点の上を図形が移動した時の明るさの変化とそれに対する反応の関係を図示したものがFig.5で、背景を黒に設定した場合の関係を示したものがFig.6である。背景が白の場合、明から暗に変化すると、すなわち白を先頭に移動した場合は図形右端の黒を過ぎた直後急激な明るさの上昇が生じ、パラソル細胞

は反応がついて行けず明るさ反応が低下する。それに対して暗から明へ変化する場合、すなわち黒を先頭に移動した場合は最初の背景の白から黒への急激な明るさ変化に反応がついて行けず、全体の明るさは実際の明るさよりも明るくなる。また背景が黒の場合、図形が黒を先頭に移動した時、右端の白を過ぎると急激に明るさが低下するが、これにパラソル細胞の反応は対応できず、実際の暗さ（黒）よりも明るく知覚し、逆に明から暗へ変化するときには図形の白が通過する直前は黒であるため急激な明るさの上昇が生じる。この場合もパラソル細胞は明るさの上昇に対応できず、白への反応が生じる前に飽和状態となり実際の明るさよりも暗く知覚することになる。これらの説明は実際の現象観察結果と一致するものであり、Cavanagh & Anstis (1986) の説明の妥当性を示すものである。

次にこの考えに従った時、Fig.7のような灰色の背景の上を移動するならば背景の明るさと運動図形の左右端の白および黒との明るさの差が小さくなるため、パラソル細胞の反応と実際の明るさとのギャップも小さくなり、錯視量も減少することが期待される。そこで実際に背景を灰色 (#777777) とした場合の中村錯視について観察したところ、仮説通り反対方向へ運動する上下の明るさの違いが小さくなる現象が観察された。ただし図からわかるように、反応と実際の明るさのギャップは小さいものの、白を先頭に運動する場合は実際の明るさよりも暗くなり、黒を先頭に運動する場合は実際の明るさよりも明るくなるのがわかる。またこの点については説明原理は異なるものの Ashida & Scott-Samuel (2014) の実験結果とも一致するものであった。

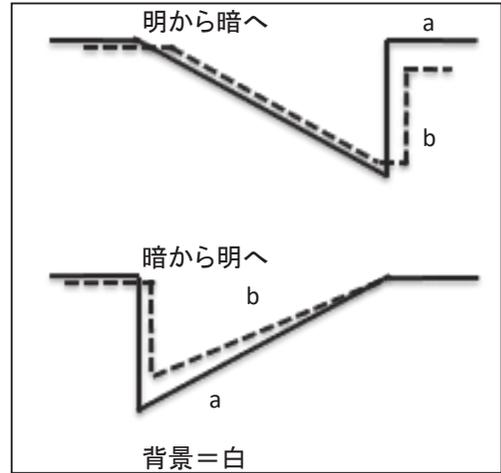


Fig.5 背景白条件で図形を移動させた時の網膜上の一点における明るさ変化 (a) とそれに対する反応 (b) 白を先頭に (明から暗へ) 移動する場合、図形右端の黒が過ぎると急激な明るさの上昇が生じるが、パラソル細胞はその変化に対応できず明るさが低下する。それに対して黒を先頭に (暗から明へ) 移動する場合、背景の白から黒への急激な明るさの減少に対応できず、実際の明るさよりも明るく知覚される。

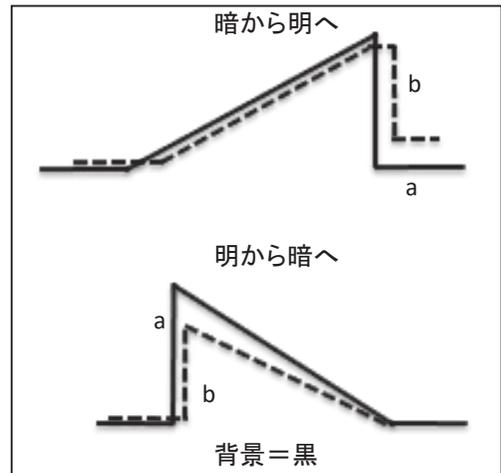


Fig.6 背景黒条件で図形を移動させた時の網膜上の一点における明るさ変化 (a) とそれに対する反応 (b) 黒を先頭に (暗から明へ) 移動する場合、図形右端の白を過ぎると急激に明るさが減少し、パラソル細胞はその明るさ減少に対応できないため、実際の明るさよりも明るく知覚される。それに対して白を先頭に (明から暗へ) 移動する場合、背景の黒から白への急激な明るさ上昇に対応できず、実際の明るさよりも暗く知覚される。

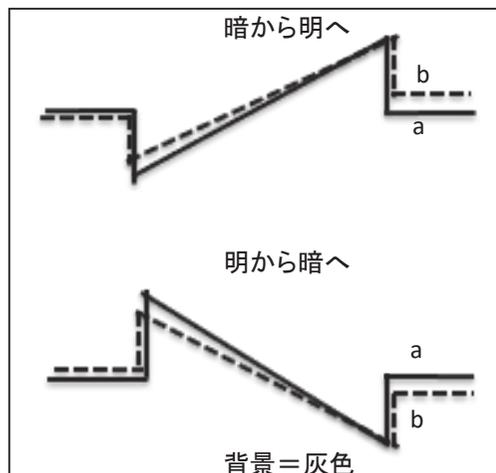


Fig.7 背景が灰色の場合の網膜上の一点における明るさ変化(a)とそれに対する反応(b)
 暗から明に変化する場合は図形右端の黒を過ぎると急激な明るさの変化が生じるが、その明るさ変化量は小さく、パラソル細胞の反応と実際の明るさのギャップは小さい。明から暗へ変化する場合も同様に反応と実際の明るさのギャップは小さくなる。

3. Cavanagh & Anstis 説検証のための実験観察 1

Cavanagh & Anstis (1986) による説明では網膜神経節細胞の一つであるパラソル細胞の一過性反応という性質が中村錯視を引き起こす理由であると考えられるが、もしそうであるならば、中村錯視は明るさの錯視であるため、明るさの違いが残効として現れるか否かをチェックする必要がある。すなわち色や明るさの残効は網膜および外側膝状体に関与していることが広く知られており (Snowden, Thompson & Troscianko, 2012)、この中村錯視においても明るさ残効が認められるか否かを実験的に調べた。

Fig.2に示したように上半分と下半分を左右反対方向に動かした時に上下で明るさの違いが知覚されるが、図形中心部に提示された凝視点を20秒間凝視した直後、刺激提示画面を一樣な明るさの平面に切り替えた時、図

形が動いている時の明るさの違いが逆転する負の明るさ残効が生じるか否かを調べたのである。実験の結果著者を含めた5名の被験者全員に明るさ残効が認められた。当然ではあるが、上下半分の移動方向を逆転しても知覚される明るさに応じた明るさ残効が認められた。

またこの明るさ残効は背景が白の場合も黒の場合も認められたが、灰色が背景の条件においては明るさ残効は弱いことがわかった。この結果から中村錯視が第一次視覚野以前の機序によって生じていることが示唆された。また背景が灰色の条件において運動残効が弱いということは上下で反対方向に動かした時に見られる明るさ錯視が弱いことを示唆するもので、これは背景が灰色の時の明るさ錯視の錯視量が小さいこととも一致するものである。

4. Cavanagh & Anstis 説検証のための実験観察 2

上記の実験観察の結果、中村錯視が第一次視覚野以前の処理過程に起因して生じていることが示唆されたが、もしそうであれば明るさ残効の両眼間転移が認められないことも予測される。第一次視覚野においては両眼融合、すなわち左右の眼球がおよそ7cm離れていることによって生じる両眼網膜像差を融合することによって奥行きなどの立体視の処理が行われていることが知られているが、もし両眼間転移が生じなければやはり第一次視覚野以前の処理過程において中村錯視が生じていることが確認されることになる。この点を確認するための実験観察を以下のように実施した。

Fig.2に示すような上下で反対方向へ移動する中村錯視を刺激提示画面に提示し、片方の眼によってのみ刺激提示画面を観察できる

状況を作った。Fig.8はその観察状況を俯瞰図で示したものである。Fig.8(1)では左眼は左右切り替え衝立によって遮られており、右眼のみ刺激提示画面の観察が可能である。この状態で20秒間観察する。その後提示画面に一樣な白い面を提示すると同時に衝立をFig.8(2)の状態に移動すると左眼だけによる白画面の観察が可能になる。もし両眼間転移が起きるのであれば、左眼においても明るさ残効が観察されるはずである。

観察者は著者を含めて2名であったが、両者に両眼間転移は認められず、中村錯視刺激を観察した方の眼においてのみ明るさ残効が観察された。順応刺激を左眼に提示する条件でも実施したが同様の結果であった。明るさ残効はある程度の時間持続するので、一旦反対側へ衝立を切り替えた後、順応刺激を観察した眼の方に再度衝立を切り替えても明瞭な明るさ残効は観察された。

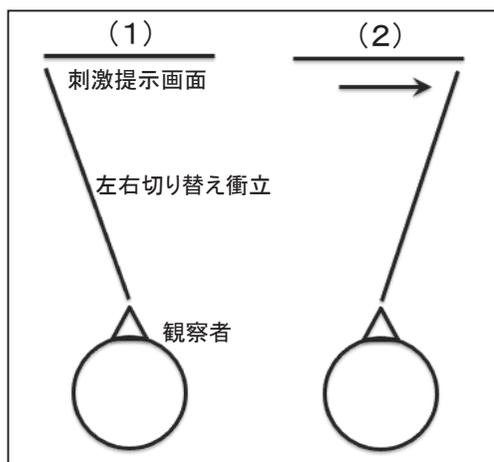


Fig. 8 中村錯視の両眼間転移の有無を検証するための実験
図は観察者がFig.2に示した中村錯視を観察する様子の俯瞰図である。(1)左眼は左右切り替え衝立によって遮られており、右眼のみ刺激提示画面の観察が可能である。この状態で20秒間観察する。その後提示画面に一樣な白い面を提示すると同時に衝立を(2)の状態に移動すると左眼だけによる白画面の観察が可能になる。もし両眼間転移が起きるのであれば、左眼においても明るさ残効が観察されるはずである。

5. 考察

以上の二つの実験観察の結果から、網膜神経節細胞の一つであるパラソル細胞の一過性に反応するため、急激な明るさ変化に十分に対応できないという性質が中村錯視の原因であるというCavanagh & Anstis (1986) 説明原理適用の妥当性が示唆された。

また彼らを用いた刺激図形はFig.4に示したような画面全体に明るさの勾配をもつ図形が配置されているが、中村錯視においては明るさの勾配をもつ楕円図形が間隔をおいて配置されたものである。この点が両者の間で用いた刺激図形の違いであり、中村錯視においてはこの明るさの勾配を持たない背景の明るさも異なって知覚されたが、これについては図形における明るさの変化が周りの空間に同化したものと考えられることができる。しかし実験観察1において観察された明るさ残効において、明るさ勾配をもつ楕円図形が横一列に並んだ領域とその上下の空白の領域に対する残効の強さは異なっており、知覚された明るさの減衰が明るさ勾配によるものであることが理解できる。

6. Ashida & Scott-Samuel(2014)による説明

彼らの実験においてまず確認されていることは、中村錯視が生じるためには明るさ変化が緩やかな勾配をもつ必要があるという点である。矩形波状に明るさが変化する刺激においては明るさ錯視が生じない。そして中村錯視における明るさ勾配のある刺激が動いた時、網膜上の特定の位置において時間的に明るさが勾配に従って変化する刺激が投射されることになるが、Murakami, Kitaoka, & Ashida(2006)によるとコントラストが増大する方向に明るさが勾配をもって変化する

場合はその明るさ変化が過小評価され、逆にコントラストが減少方向に変化する場合は過大評価されることから、Ashida & Scott-Samuel はこの性質によって中村錯視を説明できるとしている。彼らの実験に用いられた移動図形は左右に明るさの勾配(白→灰色あるいは灰色→黒)をもつ矩形で、中村錯視同様に配列して画面全体を動かした時の明るさ知覚を調べている。Fig.9は灰色を背景として白から灰色へ明るさの変化勾配をもつ刺激を動かした時の実際の明るさとそれに対する反応のギャップを Murakami et al.(2006) の仮説を適用して示したものである。上の図では矩形の灰色を先頭に移動した場合、下の図では白を先頭に移動した場合の実際の明るさの変化(a)とそれに対する反応(b)を示している。これは実験結果と一致するものではあるが、この図からわかるように、どちらを先頭に移動しても知覚された明るさは実際の明るさに比べてより暗く知覚されることがわかる。しかし白を先頭に移動した場合は背景の灰色よりも暗くなる範囲があるのに対して灰色を先頭に移動した場合は最も明るい白に達することはないが、背景の灰色より暗くなる範囲がなく、白を先頭に移動するときよりも明るく知覚されることが理解できる。同様のことは灰色→黒の明るさ勾配をもつ図形を移動した条件においても観察され、ここで用いた仮説の妥当性が認められる。

しかし背景を白として白→灰色(あるいは黒)の明るさの勾配をもつ図形を移動させた条件に Ashida & Scott-Samuel (2014) の説明原理を当てはめると、実際に観察される錯視現象とは異なる結果が予測される。Fig.10は、背景を白とした場合に予測される実際の明るさ(a)と知覚される明るさ(b)のギャップを示したものである。Fig.10の上の図では明るさの勾配をもつ図形が白を先頭として移動した場合、下の図は灰色(あるいは黒)を先頭に移動した場合に予測される実際の明る

さと知覚される明るさをこの説明原理に従って示したものである。この条件においては背景が灰色ではないため、下の図に示されるように黒を先頭に移動することによって(コントラストが減少する方向への変化)生じる過大評価が見られても白よりも明るくなることはないため、移動方向による明るさの違いが認められないか非常に小さくなってしまふ。これは背景が黒の場合も同様である。

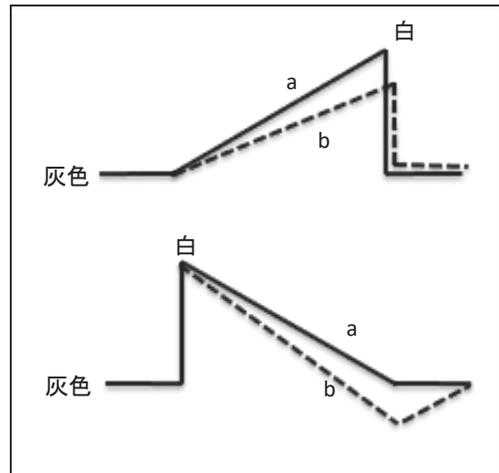


Fig.9 Ashida & Scott-Samuel (2014) に示された中村錯視の説明図
実験に用いられた移動図形は左右に明るさの勾配(灰色→白)をもつ矩形で、その結果を Murakami et al.(2006) の仮説を適用したものである。上の図では矩形の灰色を先頭に移動した場合、下の図では白を先頭に移動した場合の実際の明るさの変化(a)とそれに対する反応(b)を示している。

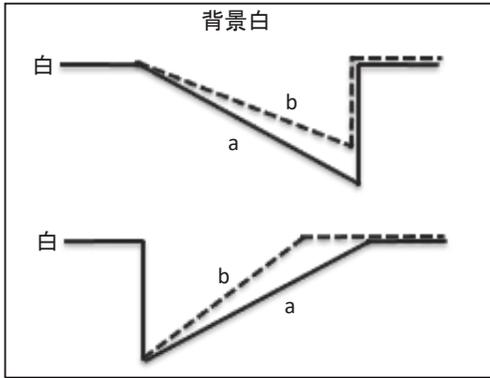


Fig.10 背景を白として白→灰色(あるいは黒)の明るさの勾配をもつ図形を移動させた条件に Ashida & Scott-Samuel (2014) の説明原理を当てはめた場合に予測される実際の明るさ (a) と知覚される明るさ (b)。

7. 総合考察

中村錯視は当初から背景を白とした条件において認められた現象であり、その後背景を黒としても同様の錯視現象が得られることが確認されたものである。従って、背景を白あるいは黒に設定した時に、その錯視現象に一致した結果を予測できる説明原理は Cavanagh & Anstis の説の方であり、この説の方が妥当性が高いように思える。特に先述の二つの観察実験で得られた結果、すなわち中村錯視における明るさの違いが明るさ残効を生じさせることは Cavanagh & Anstis の網膜神経節細胞パラソル細胞が関与しているという考えを支持するものと思われる。またこの明るさ残効に両眼間転移が認められないことは、この反応が第一次視覚野以前の処理機序によって生じていることを示すもので、これもパラソル細胞の関与を肯定する間接的証拠と言えよう。

さらに白あるいは黒を背景として明るさ勾配をもつ図形が移動する条件においてもパラソル細胞の一過性反応によって錯視現象を問題なく説明できる点はこの説の妥当性を強く支持するものである。

※注1：2010年度第2回錯視コンテストに著者が「明るさグラデーションのある図形の運動方向による明るさの違い」というタイトルでエントリーして準グランプリを受賞した錯視現象を Ashida & Scott-Samuel (2014) が中村錯視と呼んでおり、本論文においてもこの呼び方を用いることとする。

(<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/sakkon/sakkon2010.html>)

※注2：網膜神経節細胞 (ganglion cell) には3種類の細胞があると言われている。一つは外側膝状体の小細胞層 (parvocellular layer) に投射するミジェット細胞 (Midget cell)、外側膝状体の大細胞層 (magnocellular layer) に投射するパラソル細胞 (Parasol cell)、そして外側膝状体の顆粒細胞層 (koniocellular layer) に投射するバイストラティファイド細胞 (Bistratified cell) である。それぞれ、視覚機能が異なる小細胞系、大細胞系、顆粒細胞系に分かれることが知られているが、Cavanagh & Anstis は、明るさの勾配を持つ面が勾配に沿って移動する時、その移動方向によって明るさが異なって知覚される錯視現象を、パラソル細胞の一つの特徴である一過性反応によって説明しようとした。

引用文献

- Ashida, H. & Scott-Samuel, N.E. (2014). Motion influences the perception of background lightness. *i-Perception*, **5**, 41-49.
- Cavanagh, P. & Anstis, S.M. (1986). Brightness shift in drifting ramp gratings isolates a transient mechanism. *Vision Research*, **26**(6), 899-908.
- Mather, G. (2009). *Foundations of Sensation and Perception*. 2nd ed. Psychology Press.
- Murakami, I., Kitaoka, A., & Ashida, H. (2006). A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display. *Vision Research*, **46**(15), 2421-2431.
- Snowden, R., Thompson, P. & Troscianko, T. (2012). *Basic Vision. An Introduction to Visual Perception* (rev. ed.) Oxford University Press.

