

運動情報統合と運動による位置ずれとの関係

久方 瑠美・村上 郁也

東京大学大学院 総合文化研究科
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. はじめに

日常生活の中で、ある物体の位置を視覚的に把握することは必要不可欠な能力だ。しかし、物体の位置知覚という視覚処理メカニズムは未だに解明されていない。物体の運動情報がそのものの位置知覚に影響を与えることはよく知られている。DeValois & DeValois¹⁾ は、ガボールパッチの正弦波が一定方向に運動している時、その輪郭位置が運動方向側にずれて知覚される現象を報告した。これは「運動による位置ずれ」として知られ、現在多くの研究がなされている。

運動による位置ずれは、多くの運動によって引き起こされる。例えば、運動残効による運動²⁾ や2次運動³⁾、拡大縮小運動⁴⁾、ランダムドット運動⁵⁾、グローバル運動⁶⁾、3次元方向の運動⁷⁾、誘導運動⁸⁾ などである。本研究では、この運動による位置ずれが、ブラッド運動で引き起こされるのかどうか検討した。

ブラッド運動とは、異なる方向に運動する正弦波格子を2つ重ね合わせて作るもので、知覚的な運動方向は2つの正弦波格子の制約線の交点に向かうベクトル方向に一致する⁹⁾。この運動について、それぞれの要素の運動成分は視覚情報処理の初期で処理され、その後要素運動が統合されブラッド運動が知覚されると言われている。ブラッド運動にはいくつかの種類がある。正弦波格子の位置が物理的に重なり知覚的なブラッド運動方向が要素運動のベクトル和の方向とおおむね一貫するタイプ1ブラッド⁹⁾、知覚

的なブラッド運動方向が要素運動のベクトル和の方向と一致しないタイプ2ブラッド、要素運動を構成する正弦波が物理的な重なりをもたない擬似ブラッド¹⁰⁾、の3種類である。

本研究では、タイプ1ブラッド運動による位置ずれを実験1で、擬似ブラッドによる位置ずれを実験2で検討した。ブラッド刺激が含む要素運動成分が引き起こす位置ずれ量と、ブラッドの統合運動が引き起こす位置ずれ量を比べることにより、位置ずれメカニズムが視覚処理のどの段階にあるのか、位置知覚メカニズムに初期の運動情報と後期の運動情報がそれぞれどの程度影響を与えるのかを明らかにすることができる。

2. 実験 1

実験1では、タイプ1のブラッドが運動による位置ずれを引き起こすかどうか検討した。

2.1 方法

被験者 正常な視力もしくは矯正視力を持つ5名が実験に参加した。著者1名の他、実験の目的を知らない4名が被験者をつとめた。

装置 刺激はMATLAB7.3.0上でPsychophysicsToolbox (version 3)を用いて作成した。コンピュータ (Apple Power Macintosh G5) 制御のもと、22インチCRTモニタ (iiyama NM204D, refresh rate 75 Hz, 1 pixelが1 minに相当) に刺激を呈示した。平均輝度は49.5 cd/m²、観察距離は85.9 cmであった。実験で使用するLook-up tableはすべてガンマ補正されていた。

刺激 左右運動刺激 (標準偏差 24 min, 5

(2009年冬季大会発表。ベストプレゼンテーション賞。)

cpd, コントラスト 100%, 4Hz で運動する垂直方位のガボールパッチ), プラッド運動刺激(標準偏差 24 min, 5cpd, コントラスト 50% の 2 つのガボールパッチから構成される), 要素運動刺激①, ② (プラッド運動を構成するそれぞれの方位のガボールパッチ, コントラスト 100%) の 4 種類があった. プラッド運動の速度は, 4 Hz で流動するガボールパッチと同じ知覚速度となるように, 予備実験にてマッチング (階段法) により左右運動刺激と知覚速度を一致させた. 要素運動①と②の速度は, プラッド運動を構成するガボールパッチとそれぞれ同じ速度だった.

プラッド運動刺激には, 要素運動方向が $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 67.5^\circ$ の 3 条件があった (0° は刺激中心より右側水平方向)

手続き 注視点が CRT 画面中央に 1 秒間呈

示された後, 注視点が消え, その後上下視野偏心度 4 deg の位置に刺激が 1 秒間呈示された. 被験者の課題は, 下視野に呈示された刺激に比べ, 上視野に呈示された刺激の位置が左右どちらにずれていたかを判断することだった. 上下視野の刺激は同種類のものであり, 下視野の刺激は上視野の刺激と常に反対方向に運動していた. 恒常法にて, 下視野刺激と同じ水平位置に見える上視野刺激位置の主観的等価点を算出した (± 30 min, 7 段階, 各 30 試行繰り返し: ただし画面中央より右を +, 左を - とする). 1 試行内で呈示される刺激の種類はランダムだった. またプラッド運動条件は, 試行間でランダムだった.

2.2 結果

運動方向によりずれの方向が異なるため, こ

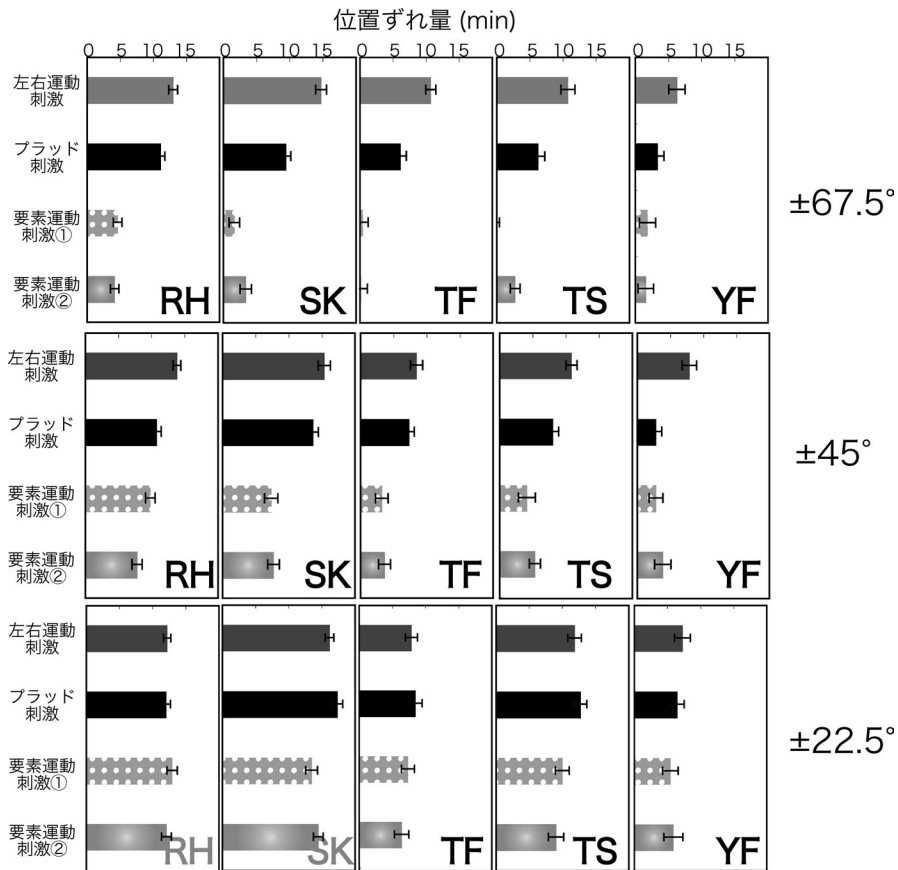


図 1. ガボール条件の被験者ごとの位置ずれ量. 横軸は位置ずれ量 (min), 縦軸は運動刺激の種類を示す. エラーバーはブートストラップ 10000 回繰り返しで得られた標準誤差.

れを統合するように、運動方向左の場合と右の場合との間で位置ずれの主観的等価点の差分を求め2で割って、位置ずれ量と定義した。図1に各ブラッド運動条件の被験者ごとの結果を示す。結果、ブラッド運動 $\pm 67.5^\circ$ の条件で、要素運動が引きおこす位置ずれ量に比べブラッド運動が引きおこす位置ずれ量が大きいことが明らかになった。

要素運動刺激①、②の水平位置ずれ量は、斜め方向に動くガボールパッチの位置ずれの cosine で近似できた。しかしながら、ブラッド運動の引きおこす位置ずれ量は各要素運動の位置ずれ量からはうまく予測できない結果となった。

3. 実験 2

実験2では、要素運動が物理的重なりをもたない擬似ブラッドで運動による位置ずれが起こるかどうかを検討した。擬似ブラッド刺激として、Amano ら¹¹⁾の Multiple Gabor を用いた。

3.1 方法

被験者 正常な視力もしくは矯正視力を持つ3名が実験に参加した。著者1名の他、実験の目的を知らない2名が被験者をつとめた

装置 刺激は MATLAB7.5.0 上で PsychophysicsToolbox (version 3) を用いて作成した。コンピュータ (Apple MacPro with OS 10.4.11) 制御のもと、22 インチ CRT モニタ (Mitsubishi RDF223H, refresh rate 75Hz, 1 pixel が 1min に相当) に刺激を呈示した。平均輝度は 48 cd/m^2 、観察距離は 85.9 cm であった。実験で使用する Look-up table はすべてガンマ補正されていた。

刺激 擬似ブラッド運動をする刺激として、ランダムな方位の複数のガボールパッチからなる Multiple Gabor を用いた。要素ガボールパッチは、標準偏差 9 min, 2 cpd, コントラスト 80% で1つの Multiple Gabor は 21 個の要素から構成されていた。それぞれの要素ガボールパッチの方位はランダムだったが、右または左の統合運動を起こすように方位により速度が変化していた。すなわち、要素ガボールパッチの

速度は、ガボールパッチ方位の余弦関数に従い変化した。

要素ガボールパッチが持つ最大速度は 2Hz, 4Hz, 8Hz, 静止の計 4 条件があった。また Multiple Gabor を構成する要素ガボールパッチが統合運動にどの程度寄与するかという度合いを変えるために、信号 % を 100% 条件と 50% 条件の 2 条件設けた。すなわち、100% 条件ではすべての要素ガボールパッチが統合運動を引き起こすように運動し、50% 条件では半分 (10 個) の要素ガボールパッチは統合運動を引き起こすように運動するがもう半分 (11 個) の要素はランダムな速度で運動した。

実験前に、各条件・各運動方向 (左右) ごとに Multiple Gabor 刺激を 500 セットをあらかじめ作成しておき、実験時に刺激プールの中から刺激をランダムに抽出した。その際 1 試行内で同じ Multiple Gabor の刺激が 2 回呈示されないようにした。

手続き 注視点が CRT 画面中央に 1 秒間呈示された後、注視点が消え、上下視野偏心度 6 deg の位置に Multiple Gabor 刺激が 0.5 秒間呈示された (図2)。被験者の課題は、下視野に呈示された刺激にくらべて上視野の刺激の全体的な位置が左右どちらにずれているかを判断することだった。下視野の刺激は、上視野に呈示さ

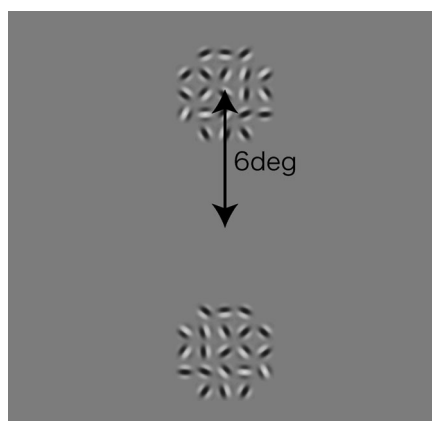


図2. 実験2の刺激画面例。Multiple Gabor の中心と画面中央は 6 deg 離れていた。上下に呈示された刺激は鏡映像になっており、常に反対方向に運動していた。

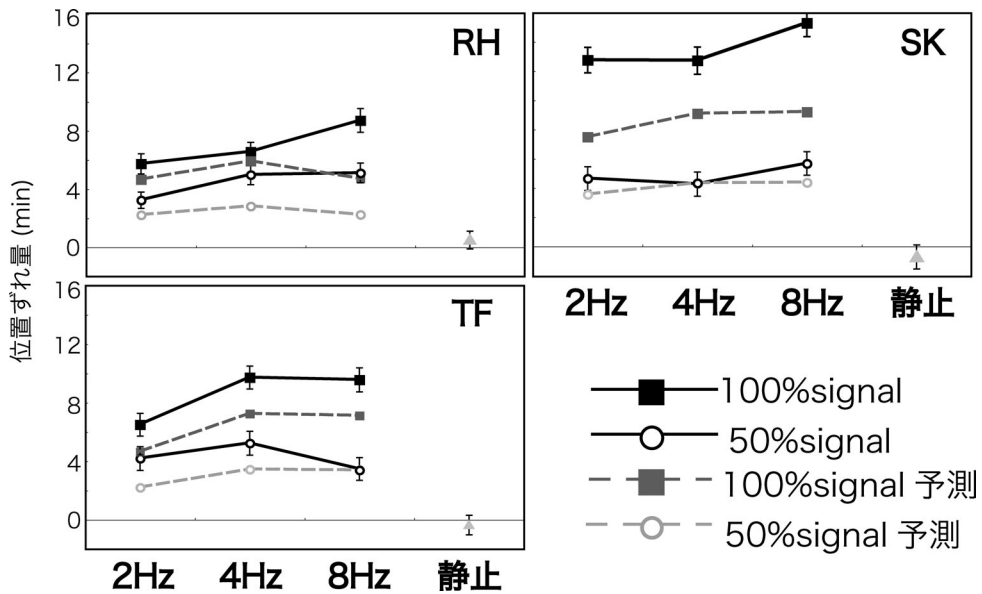


図3. 要素ガボールパッチおよび信号率の被験者ごとの位置ずれ量. 横軸は要素ガボールパッチの速度, 縦軸は位置ずれ量を示す. エラーバーはブートストラップ 10000 回繰り返しで得られた標準偏差.

れた刺激の鏡映像で, 常に上視野刺激とは反対方向に運動していた. 実験 1 と同様に恒常法にて上視野刺激のずれの主観的等価点を算出した (被験者 RH および TF: ± 17 min, 7 段階, 被験者 SK: ± 25 min, 7 段階, 各 30 試行繰り返し). 1 試行内で, すべての条件をランダムに呈示した.

3.2 結果

位置ずれ量は実験 1 と同様に定義した. 図 3 に各被験者ごとの結果を示した. この結果から, 信号率 100% の Multiple Gabor の方が信号率 50% のものよりも位置ずれ量が大きくなった. また, 要素ガボールパッチが持つ速度により位置ずれ量は大きく変化しないことが示唆された.

次に, 実験 1 と同様に各要素ガボールパッチの位置ずれ量から Multiple Gabor の位置ずれ量が予測できるかどうかを検討した. このために, 要素ガボールパッチ 1 つが引き起こす位置ずれ量を測定する補足実験を行った (図 4 に詳細). 実験 1 と同様に, 斜め方向の位置ずれの水平軸上の射影で要素の位置ずれが予測できるというモデルのもとに, 各要素ガボールパッチが引き



図4. 補足実験の刺激画面例. Multiple Gabor の要素ガボールパッチ 1 つ (垂直方位) が画面中央から偏心度 6 deg 離れた位置に呈示された. 被験者の課題は, 上の刺激が下の刺激に比べて左右どちらにずれていたかを回答することだった. 上下の刺激は常に反対方向に運動していた. 位置ずれ量は恒常法にて実験 1・2 と同様の方法で求めた.

起こす位置ずれ量をそれぞれの条件・被験者ごとに算出した. 信号率 100% 条件では, すべての要素ガボールパッチが引き起こす位置ずれ量の平均値を Multiple Gabor が引き起こす位置ずれ量の予測値とした. 信号率 50% 条件では, 10 個の要素ガボールパッチが引き起こす位置ずれ

量の平均値を Multiple Gabor の位置ずれ予測値とした。それらを図 3 の点線で示した。結果として、それぞれの被験者で個人差はあるものの、実測した Multiple Gabor の位置ずれ量は予測値よりも大きくなり、統合運動が引き起こす位置ずれ量は、要素から予測されるずれよりも大きいことが明らかになった。

4. 考 察

実験 1・実験 2 の結果から、統合運動が位置ずれを引き起こすことが明らかになり、それらは要素運動の位置ずれだけでは説明できないことが明らかになった。これは、初期で処理される運動情報だけでなく、知覚的な統合運動情報も位置知覚処理に影響を与えることを示している。

先行研究において、視覚処理初期（特に V1）と後期（MT など）の相互作用により運動による位置ずれが発生すると示唆されている。Chung ら¹²⁾では、運動方向側への神経細胞の応答促進が、位置知覚に重要な物体の重心位置のずれを引き起こすとし、これが知覚的輪郭位置のずれの原因となるというモデルを提案している。今回の実験結果から、この運動方向側への応答促進は初期で検出された運動情報によるものだけでなく、情報処理後期で処理される運動情報も応答促進を促していると考えられる。すなわち、視覚処理初期の物体位置表現に、初期の運動情報がまず影響を与え、その後に統合運動や 2 次運動など視覚処理後期で処理される運動情報がフィードバック的に影響を与える。このモデルは、様々な運動が位置ずれを引き起こすという先行研究の結果とも矛盾しない。

本研究の結果は、これまで曖昧な議論に留まっていた、視覚処理段階と位置ずれ発生メカニズムの関係について明確な示唆を与えるものである。今後より詳細にさまざまな運動情報と位置知覚メカニズムの関係について検討すべく、ブラッド運動における呈示時間や知覚的運動速度の影響を検討する。

文 献

- 1) R. DeValois & K. DeValois: Vernier acuity with stationary moving gabors. *Vision Research*, **31**, 1619–1626, 1991.
- 2) S. Nishida & A. Johnston: Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern. *Nature*, **397**, 610–612, 1999
- 3) D. W. Bressler & D. Whitney: Second-order motion shifts perceived position. *Vision Research*, **46**, 1120–1128, 2006.
- 4) D. Whitaker, P. V. McGraw & S. Pearson: Non-veridical size perception of expanding and contracting objects, *Vision Research*, **39**, 2999–3009, 1999.
- 5) V. S. Ramachandran & S. M. Anstis: Illusory displacement of equiluminous kinetic edges. *Perception*, **19**, 611–616, 1990.
- 6) A. J. Mussap & N. Prins: On the perceived location of global motion. *Vision Research*, **42**, 761–769, 2002.
- 7) S. Y. Tsui, S. K. Khoo & A. Hayes: Apparent position in depth of stationary moving three-dimensional objects. *Vision Research*, **47**, 8–15, 2007.
- 8) D. Whitney & P. Cavanagh: Motion distorts visual space: shifting the perceived position of remote stationary objects. *Nature Neuroscience*, **3**, 954–959, 2000.
- 9) E. H. Adelson & J. A. Movshon: Phenomenal coherence of mobbing visual patterns, *Nature*, **300**, 523–525, 1982.
- 10) T. Takeuchi: Effect of contrast on the perception of moving multiple Gabor patterns, *Vision Research*, **38**, 3069–3082, 1998.
- 11) K. Amano, M. Edwards, D. Badcock & S. Nishida: Adaptive pooling of visual motion signals by the human visual system revealed with a novel multi-element stimulus, *Journal of Vision*, **9**, 1–25, 2009.
- 12) S. T. L. Chung, S. S. Patel, H. E. Bedell & O. Yilmaz: Spatial and temporal properties of the illusory motion-induced position shift for drifting stimuli, *Vision Research*, **47**, 231–243, 2007.