

「論文の内容の要旨」

論文題目：Psychophysical properties and neurophysiological bases of contextual modulation in visual motion perception
(運動視知覚における文脈効果の心理物理学的諸相と神経生理学的基盤)

氏名：竹村 浩昌

背景・目的

私たちの視知覚は局所的な視覚入力の集合ではなく、視野上の異なる位置に
入力される信号間の相互作用を経て成立している。例えば、周辺の刺激情報に
依存して、色や明るさなどの知覚が変化することは心理学において広く知られ
てきた。このような知覚の変調は文脈効果と呼ばれ、様々な視覚属性に共通し
て見られる視覚処理の共通法則である。

本博士論文では、運動視知覚における文脈効果である誘導運動 (induced motion, Duncker, 1929) に着目する。誘導運動とは、物理的には静止する刺激が、周囲の刺激が動くことで、周辺とは逆方向に動いて知覚される現象を指す。誘導運動は、運動するオブジェクトを背景から抽出するメカニズムを反映していると考えられ(Regan & Beverley, 1984; Tadin & Lappin, 2005)、誘導運動の理解は適応的な視覚機能を理解する上で重要と考えられる。

本博士論文の目的は下記の二点である。第一の目的は、誘導運動が知覚課題の成績に与える影響を検討することで、特に誘導運動により知覚課題の成績が向上する現象に着目する。このような現象の理解を通じて、視覚系が文脈手がかりをどのように効率的に利用し、運動視知覚を構築しているのかを明らかにできる。本博士論文では、誘導運動が最小運動検出感度 (第2章) および運動透明視の知覚 (第3章) に及ぼす影響を検討した。第二の目的は、誘導運動と神経活動との関連について検討することである。誘導運動は、マカクザルにおける MT 野ニューロンの特性と類似していると言われてきた(Murakami & Shimojo, 1993; 1996; Tadin et al., 2003)。しかし、主観的な誘導運動の知覚と神経活動の関係は未だに明らかになっていない。本博士論文では、機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging; fMRI)を用いて、視覚皮質における神経活動と主観的な誘導運動の知覚の関連について検討した (第4章)。

運動視知覚における文脈効果の心理物理学的諸相に関する検討

第二章：直交する錯覚運動が最小運動検出感度に及ぼす影響

非常に遅く運動する刺激は静止刺激として知覚され、運動を検出することは困難である。このような非常に遅い運動に対する検出感度を最小運動検出感度と呼ぶ。視覚運動情報は、局所的な要素運動の処理がなされる初期の段階、複数の運動成分が統合される後期の段階を経て処理されることが知られている(Adelson & Movshon, 1982)。最小運動検出感度と運動の統合の関連が検討できれば、視覚運動情報処理のどの段階で最小運動検出感度が定まるのかを知ることができる。第2章では、一見すると課題に無関連な直交方向の錯覚運動成分との統合が最小運動検出感度に与える影響を調べ、この問題について検討した。

実験では、視覚刺激の中心部に水平方向に運動するガボールパッチ(ガウシアン窓内に限局した正弦波縞)、周辺部に垂直方向に運動する正弦波縞を呈示した。誘導運動の影響で、中心部の刺激は誘導運動と物理運動が加算された斜め方向に動いて知覚される。この刺激を用い、中心部の刺激の運動方向(右または左)を弁別する運動検出課題を行い、周辺部の刺激が静止する条件と、一定の速度(0.01-2.34Hz)で運動する条件の成績を比較した。中心部の刺激の速度は条件間で同一であった。その結果、周辺が比較的遅い速度で運動する条件で、周辺が静止する条件よりも運動検出感度が向上することが明らかになった(図1)。

さらに、運動する刺激への順応によって生じる運動残効(motion aftereffect)と呼ばれる錯覚運動を用いて同様の検討を行った。この実験では、垂直方向の正弦波縞の運動に順応した直後に、テスト刺激として水平方向に運動するガボールパッチを呈示した。運動残効の影響で、物理的には水平に運動するテスト刺激が斜め方向に動いて知覚される。誘導運動を用いた実験と同様に、順応刺激が運動する条件と、静止する条件における、テスト刺激に対する運動検出感度を比較した。その結果、一定の強度の運動残効が起こる条件で、静止した刺激に順応する条件よりも運動検出感度が向上することが明らかになった。

これらの結果から、垂直方向の錯覚運動成分との統合を通じて知覚運動方向が変化することに伴い、通常では検出できない水平方向の運動が、検出可能となることが示された。この結果は、最小運動検出感度が、空間的・時間的な文脈情報との統合が生じるよりも後の処理過程で定まっていることを示唆する。

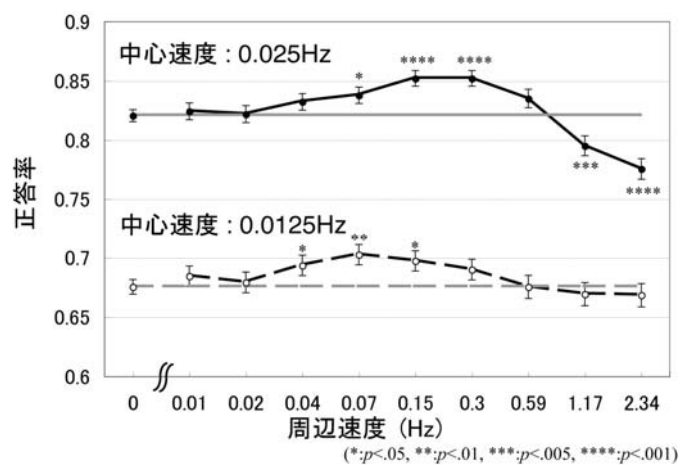


図1. 誘導運動が運動検出感度に及ぼす影響。横軸は周辺刺激の速度、縦軸は正答率を表す。
(*: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .005$, ****: $p < .001$)

第三章：誘導運動が運動透明視に及ぼす影響

日常生活における視覚入力では多くの局所的な運動成分が含まれ、視覚系はこれらを単一のオブジェクトの運動情報として統合する必要がある。一方、複数のオブジェクトが同一視野上で動く場面では、入力された運動情報を2方向の運動として処理することが適応的である。

視覚系は様々な情報に基づき、これら2種類の知覚を切り替えている。例えば、同一視野上に2方向の運動成分を呈示した場合、運動方向の差が大きければ2つの運動が同時に知覚され（運動透明視）、小さければ1方向の運動に統合して知覚される（コヒーレント運動; van Doorn & Koenderink, 1982）。それでは、これらの知覚が成立する上で、文脈的な情報はどのように関わっているのだろうか。第3章では、運動透明視と誘導運動の関連について検討した。

実験では、刺激の中心部と周辺部に異なる運動パターンを示すランダムドットを呈示した。刺激の中心部には、近接した2方向（例：上方向を中心に $\pm 45^\circ$ の方向）に運動するドットを呈示した。周辺部のドットに関しては、中心部に呈示される2方向の平均の方向（例：上方向）に

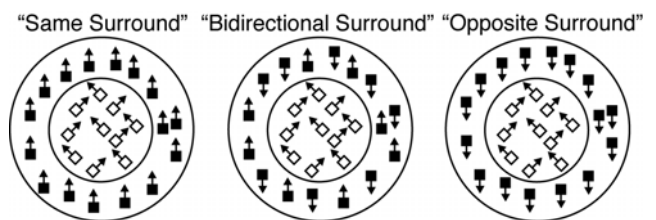


図2. 第3章の刺激条件の概念図。

運動する Same Surround 条件、その逆方向（例：下方向）に運動する Opposite Surround 条件、上方向と下方向の両者が半分ずつである Bidirectional Surround 条件を設けた（図2）。実験参加者は、刺激中心部の運動が1方向に見えたか、2方向に見えたかを回答し、次に方向マッチング法により知覚運動方向を回答した。結果において、Same Surround 条件では、2方向の運動が同時に知覚される割合が高くなった。加えて、知覚運動方向が周辺の運動と逆方向側に偏ることによって、2方向の運動方向の差が大きくなって知覚された。一方、Opposite Surround 条件では、1方向に統合された運動が知覚される割合が高くなった。これらの結果は、視覚運動情報が運動透明視として解釈されるか、あるいはコヒーレント運動として解釈されるかは、周辺の空間に存在する文脈手がかりを通じて変調した運動方向の表現に基づき定まっていることを示唆する。

運動視知覚における文脈効果の神経相関に関する検討

第四章：ヒト視覚皮質における誘導運動の神経相関

第4章では、主観的な誘導運動知覚と神経活動を直接比較するため、fMRIを用いて誘導運動知覚時のヒト視覚皮質の活動を調べた。

実験では、刺激周辺部に一定の速度で運動するランダムノイズ、中心部にガボールパッチを呈示した。中心部のガボールパッチについては、周辺と同方向あるいは逆方向に運動する条件、物理的に静止する条件を用いた。fMRI 実験に先立ち、各実験参加者において中心部が主観的に静止する運動速度（キャンセル速度）を心理物理実験により求めた。BOLD 信号変化率が誘導運動の知覚と相関する脳部位を同定するため、様々な速度で中心刺激を動かした際に生じる賦活量を記録した結果、視覚運動処理に関連する hMT+野の活動が、刺激周辺部と中心部が逆方向に動き中心刺激の知覚速度が最大になる条件で最も大きくなり、かつ、主観的に静止するキャンセル速度で中心部が動いている条件において最も小さくなり、誘導運動知覚との対応がみられた（図 3）。この傾向は V1 野など初期の領野に比べ、hMT+野において最も顕著に見られた。この結果は、hMT+野と主観的な誘導運動の知覚が関連すること、hMT+野が背景から運動するオブジェクトを検出する上で重要な役割を果たしていることを示唆する。

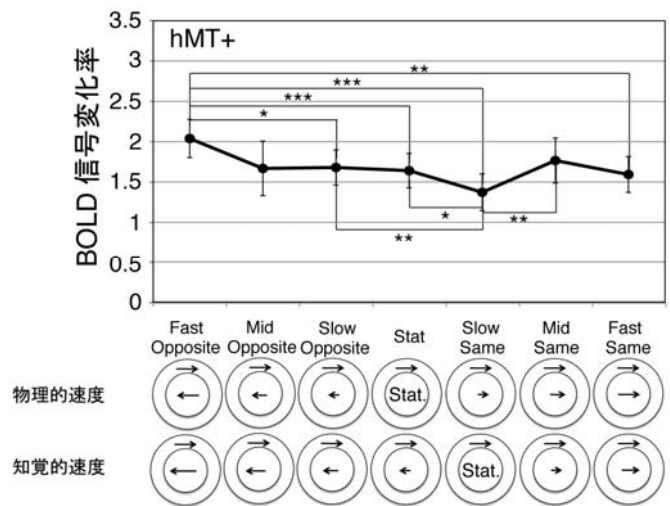


図 3. 誘導運動知覚時の hMT+野における神経活動。横軸は実験条件、縦軸は BOLD 信号変化率を表し、アスタリスクは統計的有意水準を表す(*, $p < .05$; **, $p < .01$; ***, $p < .005$)。

総合考察

第 2 章、第 3 章の研究により、最小運動検出感度および運動透明視の知覚が、周辺部の文脈手がかりによって変調した情報表現に基づいて定まることが示唆された。これら心理物理実験の結果は、マカクザルの MT 野ニューロンの集団応答に基づく計算論的モデルによる予測ともよく一致する(Tajima et al., 2010)。しかし、主観的な誘導運動の知覚とニューロン活動の関連は実験的に実証されおらず、両者を単純に比較することには限界があった。

そのため、第 4 章では fMRI を用い、主観的な誘導運動の知覚が hMT+野の活動と関連することを示した。このことから、hMT+野において運動情報の空間的な対比がなされ、その処理に基づき誘導運動の知覚が成立すると考えられる。今後包括的に誘導運動の神経基盤を解明するためには、第 4 章の成果に基づき、第 2 章・第 3 章で用いられた実験設定において hMT+野がどのような賦活を示すのかを検討する必要がある。加えて、脳磁図など時間解像度の高い計測手法と組み合わせることで、意識的な誘導運動の知覚がどのような領野間の情報伝達によって成立するのかを将来的に検討することが可能となるだろう。