

運動知覚における「うごき」のオブジェクト性： ランダムドット運動錯視を用いた数値的予測と実験的検証

“Object” in random dots motion illusion: numerical prediction and preliminary experiment

鳥居 拓馬, 日高 昇平
Takuma Torii, Shohei Hidaka

北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology
{tak.torii, shhidaka}@jaist.ac.jp

概要

人は時空間的に変化する複数の対象を統合された1つの対象(オブジェクト)として知覚する。特定の動画などの写真の系列に対して人は「うごき」を知覚する。本研究では「うごき」に関するオブジェクト性を探るべく、ランダムドットを用いた運動錯視を調べた。運動刺激の局所的特性を重視する仮説と全体的特性を重視する仮説に基づくモデルの予測を導き出した。この予測を予備的な心理実験で検証したところ、全体的仮説と定性的に類似した傾向をえた。この結果は、人間は並進するランダムドット全体をひとつのオブジェクトと知覚することを示唆する。

キーワード：運動錯視 (motion illusion), ランダムドット (random dot), オブジェクト認知 (object cognition)

1. はじめに

刺激の物理特性とその知覚特性が一致しない現象を錯覚という。視覚に関する錯覚をとくに錯視という。錯覚はヒトの認識を探る手段となる。錯視の代表的な応用のひとつが動画(アニメーション)である。1本の動画とは複数枚の静止画を切り換えて表示するという仕組みであるが、十分な速さで切り換わる静止画の系列を人は断続的な「複数の静止画」と知覚せずむしろ連続的な「1本の動画」と錯覚する。この錯視はいつでも生じる訳でなく、静止画の内容に依存し、例えば無差別に集めた様々な自動車の写真を切り換えて表示しても、それは「複数の静止画」の瞬間提示と知覚されるだろう。この事例に限らず、時空間的に変化する複数の対象を1つの対象(まとめ)として知覚することはオブジェクト認知[1][2]と呼ばれ、高次認知との接面に位置すると考えられる。

動画に関する錯視を引き起こす要因のひとつにストロボ効果がある。ストロボ効果とは波形の連続関数を一定周波数で標本化して離散関数に変換するとき、標本化周波数が長すぎると元の連続信号を一意に復元できず、複数の解釈(複数の異なる元の連続信号の候補)

を与えることから生じる。ストロボ効果によると考えられる錯視のひとつ、ワゴンホイール錯視では、回転運動する物体(車のホイールや飛行機のプロペラなど)の回転周波数とそれをビデオ記録する標本化周波数を調整すると、本来の回転速度よりも速く回転して見えたり、また回転物体の回転方向とは逆向きに回転して見えるなどの錯視を引き起こす[3,4]。周期境界的な並進運動でもワゴンホイール錯視は生じる。

ワゴンホイール錯視は、時空間的に変化する対象に対して、どのように人が「うごき」を認識するかを調べる手段となる。Finlay & Dodwell [3]や Purves, Paydarfar, & Andrews [4]は、ワゴンホイール錯視に関して人の知覚する回転速度は表示上の隣接時点間でのスプーク(棒)の最近傍距離(最小角度差)から定まると仮説を立て、その仮説を支持する結果をえている。周期的パターンをもつこの錯視では最小角度差はパタンの完全な一致を引き起こす回転角度と一致する。Kline & Eagleman [5]は周期性のないランダムドットの並進運動に対しても方向反転の錯視が生じると報告しており、ワゴンホイール錯視の知覚に周期性が必要不可欠ではない可能性を主張している。また、スノーブラインド錯視[6]ではランダムドットの並進運動を空間的に遮蔽することで、元の速さよりも速く見えるという移動速度の錯視が生じることが経験的に知られている。

Kline & Eagleman [5]の結果やスノーブラインド錯視[6]の報告はランダムドットでも移動速度の錯視が生じることを示唆する。もしランダムドットでも移動速度の錯視が生じて、その錯視的な見えが最近傍仮説に従うならば、ランダムドットの並進運動では最近傍点の統計的構造は変わらないため、ほぼ静止画に見える(錯視)と予測される。しかし、これは実際に生じる知覚とは一致しない。ランダムドットでは最近傍仮説は局所空間的な特性に言及するため、仮説の言及する局所空間的な特性と、人間の知覚する大域空間的な特性との

乖離から、矛盾が生じていると考えられる。そこで本研究では、非周期的な運動錯視の例としてランダムドット運動錯視を題材とし、移動速度の錯視（見え）のメカニズムを調べる。本研究では、既存研究の仮説および著者らの仮説を踏まえた数値実験で定性的予測を示し、その予測を予備的な心理実験で検討した。

2. 錯視を説明する仮説

ある大きさの矩形の内部に、小さな円（点）が無数に描かれたパターンをランダムドットと呼ぶ。ランダムドットのうち、一部の小さな領域が観察者に提示される（図 1A）。単位時間毎にランダムドットは固定方向（左から右）に一定の速度で並進し、このとき観察者に提示される領域が同じく並進する（図 1B）。通常、観察者はランダムドットが並進したと知覚する（図 1C）。そのとき知覚される移動速度はランダムドットの並進速度に一致すると予測される（図 1C）。

次に、観察者が一定等間隔にバー（棒）を配置した格子を通してランダムドットを見とす（図 1E-H）。格子のバーに遮蔽されたドットは見えない。そのため、格子の物理特性（バーの幅やバーの間隔）は観察の空間的な標本化周波数を変える役割を担うと考えられる。

これがスノーブラインド錯視[6]に潜在するメカニズムであると考えられる。スノーブラインド錯視の作者は、ブラインドを通して雪が降る様子を見ると、ブラインドを通さずに雪が降る様子を見る場合よりも雪の落下速度が速く見ると述べている。本研究ではランダムドットは一斉に並進するが、スノーブラインド錯視の作品映像では個別の雪の結晶は不規則に揺れながら落下する。現時点ではスノーブラインド錯視と本研究の錯視との同一性は判断できないため、本研究の錯視を「スリット錯視」と呼び区別する。

スリット錯視が生じるメカニズム（仮説）を考える。まず、格子で遮蔽されない場合（図 1A-D）を考える。ランダムドットには、白い面を「図」とする見方と、黒い点を「図」とする見方がある。もし白い面を図と見るならば、ランダムドットの移動は（黒い点の模様の描かれた）白い面の全体的な移動すなわち黒い点の斉一的な移動として知覚されるだろう。他方、もし黒い点を図と見るならば、ランダムドットの移動は黒い点の個別の移動の総体として知覚されるだろう。具体的に、隣接時点間では（両側の境界を除けば）大多数の点の斉一的・剛体的な移動の下で 1 対 1 対応を構成できる（図

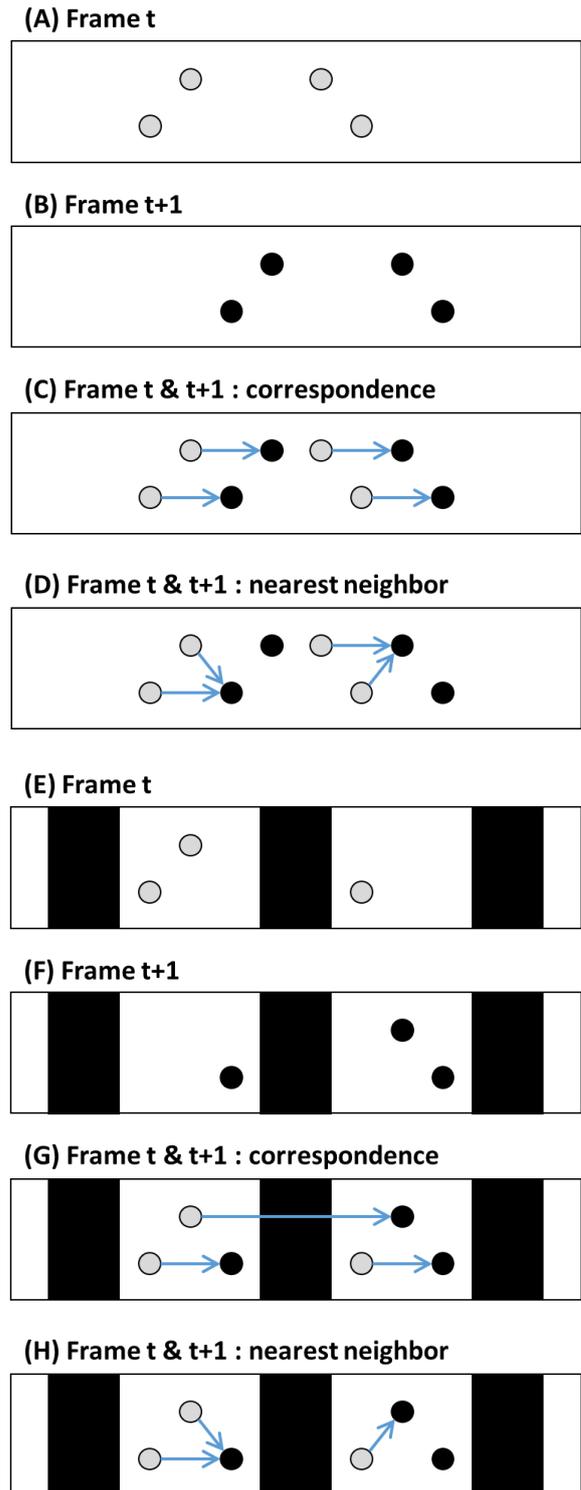


図 1. 運動速度の錯視を説明する仮説の模式図

1C). 見かけの速度に関するこれらの仮説を端的に言えば、各点の移動速度の総和から見かけの速度が決まると考えるか、それとも点群全体の移動速度から見かけの速度が決まると考えるか、さらに言えば「速度計算に

対して統合が後か先か」という違いと換言できる。こうした斉一的な対応の構成が異なる時点の静止画の同一視を可能にし、そのため異なる静止画が同一物体の位置の変化(うごき)として知覚されるという仮説を立てる(図1C)。これを斉一対応仮説と呼ぶ。

斉一対応仮説の下で、格子で遮蔽された場合(図1E-H)にどのような知覚が生じるかを予想する。一部のドットが遮蔽されると、そのドットは見えなくなるため、遮蔽されたドットは1対1対応の構成要素ではなくなる。それでも前時点(図1E)と現時点(図1F)の間で斉一的な対応を構成すべく探索すると、図に例示したようなさらに長距離の対応が選択されうる(図1G)。同一単位時間の下で、一方では他方よりも長距離の対応が見いだされることは、より速い動きが知覚されることを含意する(速度とは単位時間のあたりの移動量)。要約すると、ランダムドットと格子の移動速度が一致する場合に本来の移動速度が知覚されるが、ランダムドットと格子の移動速度がずれる場合に本来の移動速度とは異なる移動速度が知覚されると予測される。

他方、最近傍仮説の下では、もしランダムドットが空間的に統計的に同一な分布をもつならば、その局所的な空間的統計は並進によって本質的に変化しないから、格子の有無にかかわらず、本来の移動速度よりも遅いか、あるいは本来の移動速度に依らず一定の速度に見えるると予測される(図1Dと図1H)。

3. 数値計算での予測

本研究では前述の仮説に基づく数値実験を行い、定性的な予測を導き出す。この数値実験では仮説の思想を部分的に反映したあくまでも便宜的な計算である。

数値実験では、 500×1 [px] の大きさの画面を想定し、1 平方 px あたりの密度を 0.5 として母数 $\lambda = 0.5 \times 500 \times 1$ のポアソン分布から点(ドット)の表示する個数を定め、空間 \mathbb{R}^2 上の点群(ランダムドット)を生成した。視覚刺激の極端な縦横比 $500 : 1$ は数値計算上で水平方向の移動を強制するために設定した。各点の大きさは無限小とし、点群は $d = 0, 1, \dots, 9$ [px/frame] で一斉に横軸方向(向かって右)に並進する。格子の遮蔽領域の幅は $w = 5$ [px]、可視境界の幅は $l = 5$ [px] とし、格子は $b = 0, 1, 2, 3$ [px/frame] で一斉に横軸方向(向かって右)に並進する。動画の $5 + 1$ frame 分をシミュレートし、点群間の平均移動量から 1 frame あたり見かけの移動速度を推定した。

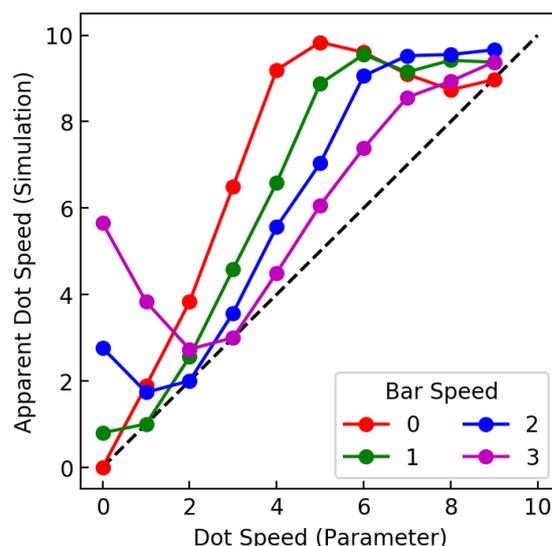


図2. 斉一対応仮説に基づく数値的予測

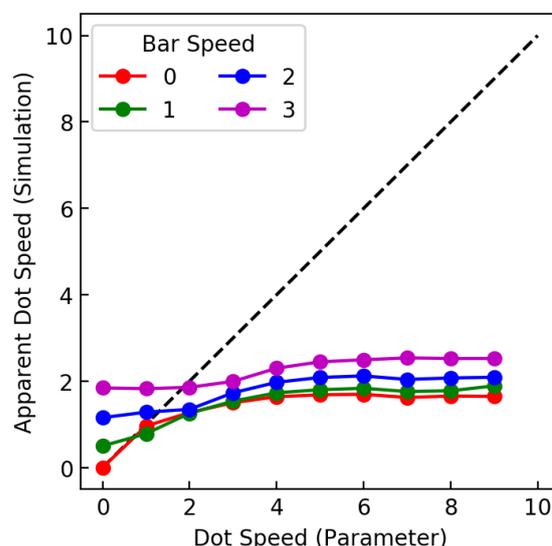


図3. 最近傍仮説に基づく数値的予測

斉一対応仮説の下では、観察データから未知なる斉一並進量 $\delta \geq 0$ を推定する。前時点の可視範囲の点群の各点を一斉に δ 並進させた点群と現時点の可視範囲の点群との間で、対応点間の合計距離を最小する1対1対応を求めた[7]。他方、最近傍仮説では、隣接時点の点群間で最近傍点を求めた。対応点間の平均速度を見かけの移動速度の予測値とした。

図2は、斉一対応仮説に基づく数値実験で求めた、見かけの移動速度の予測を示す。破線は実際の速度と見かけの速度が一致する場合を表す。図から、点群の速度と格子の速度が一致する $d = b$ の付近では、見かけの速度はほぼ実際の速度に近くなる。 $d \leq w + l$ では

見かけの速度は実際速度よりも大きくなる。点群の速度 $d = 0$ の場合でも、格子の速度 b の要因で点群が移動して見えるなどの予測を示す。

図3は、最近傍仮説に基づく数値実験で求めた、見かけの速度の予測を示す。斉一対応仮説と比較すると全体的に遅く、実際の点群の速度に依らずほぼ一定の移動速度に見えるという予測を示す。

4. 予備的な心理実験での検証

前節の数値実験でえた予測を検証するため、予備的な心理実験を行った。被験者10名のうち、1名は実験中に体調の不良のため中断し、分析から除外した。

各被験者は頭部を顎台で固定し、図4に示した実験画面を提示した。被験者から見て、1pxは約0.27mmである。コンピュータの液晶ディスプレイ(約60Hz)の画面中央(上部)に刺激動画を800×400pxで表示した。各ドットは直径10pxとした。刺激動画の直下に、見かけの速度を答えるための別の動画(回答動画)を表示した。被験者は、刺激動画中のランダムドットの移動速度と回答動画中のランダムドットの移動速度が一致するように、回答動画の速度パラメータを20段階で調整した。

予備実験では、各被験者は240条件を各3試行、合計720試行の刺激動画を評価した。各刺激動画の提示時間は最大10秒とし、各被験者あたり合計20分程度を要した。実験条件の組み合わせ数から、 $d \in \{1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$, $b \in \{1, 1.5, 2, 2.5\}$ に限定した。

先述の通り、数値計算では各ドットの大きさを無限小と仮定するなど、数値計算のパラメータと心理実験のパラメータを定量的に対応させることはできない。そのため、見当をつけるべく、予備実験の事前にある程度の範囲を探索した。本研究の予備実験の結果では、錯視なし(実際速度と見かけ速度がほぼ一致する)の傾向か、あるいは本予稿で報告する $w = 48$, $l = 5$ と定性的に類似した傾向の2種類をえた。

図5は分析結果の一部である。図2、図3と同様に、格子の速度 b および点群の速度 d に対して、被験者による見かけの速度の回答値の平均を示す。図5の結果を図2、図3の結果と比較すると、定性的には図2の斉一対応仮説の結果と類似する傾向を示している。とくに、 $d = b$ の場合には実際速度に一致して見えるが、 $d = b$ から離れるほど見かけの速度が大きくなる点が定性的には、斉一対応仮説による数値計算の予測

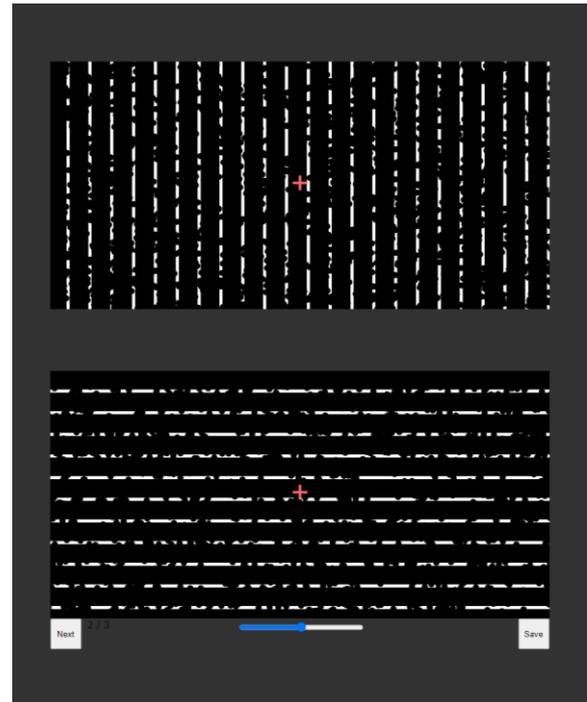


図4. 被験者に提示した実験画面

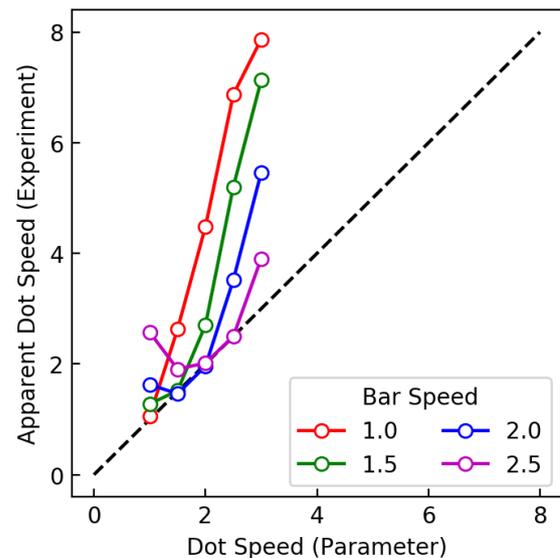


図5. 予備的な心理実験の結果(一部)

と一致している。本研究の予備実験の結果では、点群の速度 d に対して見かけの速度がほとんど変化しないという最近傍仮説の予測と一致する傾向は見られなかった。

5. 議論

本研究では、時空間的に変化する複数の対象を1つの対象(まとめ)として知覚するオブジェクト認知の機序を解明するために、ランダムドットの移動速度に

関する錯視を調べた。最近傍仮説と斉一対応仮説の下で数値実験と心理実験を行い、数値的に予測された見かけの速度が被験者の評価した見かけの速度の定性的に一致するかを調べた。その結果、斉一対応仮説とは定性的に一致する結果がえられたが、最近傍仮説の予測とは定性的にも一致しなかった。局所空間的な特性にのみ言及する最近傍仮説の予測とは一致せず、大域空間的な特性を考慮する斉一対応仮説の予測と一致する結果がえられたことは、本研究のスリット錯視のような観察対象において、人間の被験者が異なる時点で提示されたランダムドットの集合全体をひとつの時空間的なオブジェクト(まとまり)として知覚している可能性を示唆する。スノーブラインド錯視もまた同様のメカニズムで引き起こされる可能性が高い。

今後は、予備実験では限定的なパラメータの範囲しか検証できておらず、本実験では確認する必要がある。とくにそもそも格子なしの場合に本来の移動速度で知覚されるかも確認しておく必要がある。また、数値計算では非現実的な仮定(無限小の点など)を置くため、予備実験の刺激パラメータの選択は十分に任意的とは言えない。床屋の錯視のように、本研究の錯視でも窓問題は本質的と考えられ、仮説の精緻化においては未知領域の補完[2]を考慮する必要があるだろう。今後は仮説の精緻化を進めるとともに、斉一対応仮説と対応した本実験を実施し、その結果を報告する予定である。

謝辞

本研究の心理実験は北陸先端科学技術大学院大学修士課程の学生であった小山俊太君が実施しました。ここに感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP 20H04994, JST さきがけ JPMJPR20C9 の助成を受けたものです。

文献

- [1] 新美亮輔, 上田彩子, 横澤一彦 (2016) オブジェクト認知: 統合された表象と理解, 勁草書房.
- [2] 日高昇平, 高橋康介 (2019) 未知領域を含むオブジェクト同定による窓問題知覚の説明, 第36回日本認知科学会大会, O2-1, 1-3.
- [3] D. J. Finlay & P. C. Dodwell (1987) Speed of apparent motion and the wagon-wheel effect, *Perception & Psychophysics*, 41(1), 29-34.
- [4] D. Purves, J. A. Paydarfar, & T. J. Andrews (1996) The wagon wheel illusion in movies and reality, *Proceedings of National Academy of Science*, 93, 3693-3697.
- [5] K. A. Kline & D. M. Eagleman (2008) Evidence against the temporal subsampling account of illusory motion reversal,

Journal of Vision, 8(4):13, 1-5

- [6] 新正司 (2014) スノーブラインド錯視, <http://www.psych.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/sakkon/sakkon2014.html>
- [7] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2018) 剛体の集合としての身体: 等長変換下の疎な点の対応づけ, 第32回人工知能学会全国大会, 2B4-01, pp.1-4