

点の運動の観察から生じるアニマシー知覚の数理モデルの構築

Mathematical Modeling of Animacy Perception Arising from the Observation of Moving Dots

佐藤 恵助^{1*} 植田一博¹
Keisuke SATO¹ Kazuhiro UEDA¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科

¹ Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Abstract: This study proposed the following hypothesis regarding animacy perception: when humans infer intentionality from motion information, they initially estimate the direction of the goal of the movement in a Bayesian manner. The magnitude of change in this estimated direction reflects the strength of intentionality and self-propelledness, which are correlated with the perceived strength of animacy. We tested this hypothesis through an experiment in which participants evaluated animacy, intentionality, and self-propelledness for dots moving on a screen. The results revealed that although the magnitude of motion direction changes did not directly influence intentionality and self-propelledness, both the magnitude of goal direction changes and variance had a significant impact. These findings suggest that animacy perception may be realized through hierarchical Bayesian estimation.

1 はじめに

人は、幾何学図形のように生物とはかけ離れた外見を持つ対象の動きから、意図や感情などを読み取り、生き物らしさを知覚することがある。この現象はアニマシー知覚と呼ばれる [1]。アニマシー知覚は、相手の心の状態を推定する能力（心の理論）の構成要素あるいは基礎メカニズムとされ [2]、アニマシー知覚を引き起こす動きの性質について多くの研究が行われてきた。Tremoulet & Feldman [3][4] は、等速直線運動する物体が突然進行方向や速度を変える場合、方向変化の角度が大きいほど、また加速が大きいほど、より強いアニマシーが感じられることを示した。Fukai & Terada [5] も、動きの方向の変化が激しいほど、より強いアニマシーが感じられることを明らかにした。さらに、Fukuda & Ueda [6] は、ロボットの動きに $1/f$ ゆらぎを加えた場合、生き物らしさがより強く知覚されることを示した。また、Szego & Rutherford [7] は、下向きに動く物体よりも上向きに動く物体の方が、生き物らしさを強く感じる傾向があることを報告している。このように、人がどのような動きに対して生き物らしさを知覚するのかについては、さまざまな検討が行われてきた。しかし、なぜそのような動きに対して生き物らしさを感じ

るのかという、アニマシー知覚の原理については、これまで十分に解明されてこなかった。Gao et al.[9] は、対象の動きや見た目から感じられるアニマシー知覚について、注意やワーキングメモリなどの認知資源の制約の下で、対象の動きの情報のボトムアップの知覚とトップダウンの推論の相互作用の中でアニマシーが生じるとするモデルを提案している。しかし、このモデルは概念的であり、アニマシーの強さについて定量的な予測を与えるモデルではない。本研究では、アニマシー知覚が動きを生み出す隠れた原因に対するベイズ的な統計推論の過程で生じるとの仮説に基づき、アニマシー知覚の数理モデルを構築し、その妥当性を実験により検討した。

2 ベイズ推定としてのアニマシー知覚

現在の神経科学では、脳が常に外界の状態を予測しているという仮説が広く受け入れられている。この考え方は、Helmholtz の無意識的推論に端を発し、ベイズ脳仮説、予測符号化、自由エネルギー原理などの形で数理的に定式化されてきた [8]。これらの仮説に共通するのは、脳が外界に関する確率モデル（内部モデル）を持ち、そのモデルに基づいてベイズ的な統計推論を行い、外界の状態を予測しているという考え方である。

*連絡先： 東京大学大学院総合文化研究科
〒 153-8901 東京都目黒区駒場 3-8-1
E-mail: lesucree326@gmail.com

環境の状態を x 、環境の状態を生み出す隠れた原因を v とすると、内部モデルは同時分布 $p(x, v)$ で表される。脳は、ある環境の状態 x が与えられたとき、それを生み出す原因 v を、ベイズの定理に基づき以下のように計算することができる。

$$p(v|x) = \frac{p(x|v)p(v)}{p(x)}$$

このベイズ推定により最適な v を求めることは、変分自由エネルギーと呼ばれるコスト関数を最小化することと近似的に等価である。変分自由エネルギーの最小化は、理論的には階層的予測符号化ネットワーク上で解くことができ、神経回路上で実装可能であるとされる。環境の状態 x のダイナミクスが確率微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = f(x, v) + \omega_x$$

で書けて、ノイズ ω_x がガウス分布 $\mathcal{N}(0, \Sigma_x)$ に従うとすると、変分自由エネルギーは

$$\mathcal{F}(\mu_x, \mu_v) = -\log p(\mu_x, \mu_v) = \frac{1}{2} \Sigma_x^{-1} \varepsilon_x^2 - \log p(\mu_v)$$

と表される。ここで、 μ_x, μ_v は x, v の現在の期待値であり、

$$\varepsilon_x = \dot{x} - f(\mu_x, \mu_v)$$

は、環境 x の状態の変化 \dot{x} と、環境の状態の変化に対する現在の予測値 $f(\mu_x, \mu_v)$ の差、すなわち予測誤差を表している。この変分自由エネルギー \mathcal{F} を最小化する v は勾配降下法で求めることができ、その更新式は

$$\dot{\mu}_v \propto -\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_v} = \frac{\partial f}{\partial \mu_v} \Sigma_x^{-1} \varepsilon_x + \frac{\partial}{\partial \mu_v} \log p(\mu_v).$$

となる。すなわち、隠れ原因の予測 μ_v の更新には、環境の状態の変化に対する予測誤差 ε_x に関する項と、隠れ原因に対する予測 $p(\mu_v)$ に関する項が影響する。前者がボトムアップ的な知覚であり、後者がトップダウン的な知覚に相当する [10]。ここでは簡単のため x, v のみで表現される単純な環境の構造を仮定したが、より複雑で階層的な、すなわち隠れた原因 v を生み出す背景にさらに隠れた原因があるような構造を持つ環境に対しても、同様の計算で隠れた原因をベイズ的に推論することができる。この計算は、低次の知覚情報を扱う層と高次の情報を扱う層が積み重なった階層的な神経回路上で、各層が相互に情報をやりとりすることで実行できる。このような神経回路を階層的予測符号化 (Hierarchical Predictive Coding) ネットワークと呼ぶ [11]。予測符号化ネットワークは、画像処理系の深層学習モデルとして、脳の視覚野の階層構造をもとに提案されていたもの [12] と同様のアーキテクチャである。

ベイズ推定は脳の普遍的な計算原理であるとされており、心の理論もベイズ推定に基づいている可能性が

指摘されている (たとえば、相手の行動を環境の状態を x 、その行動を生み出す原因となった意図・願望・嗜好などの心の状態を v とみなす) [13]。本研究では、心の理論がベイズ推定に基づいているのであれば、その構成要素あるいは基礎メカニズムにあたりとされるアニメシー知覚もまたベイズ推定により実現されているのではないかと考えた。

たとえば、1. で挙げた先行研究 [3][4][5][6] の結果は、アニメシー知覚が生じるのは、動きが予測から外れたとき、すなわち予測誤差が生じたときである、と解釈できる。また先行研究 [7] の結果は、普通の物体は重力に従って落下していくことが多いという知識 (内部モデル) に基づいた動きの予測から、実際の動きが大きく外れたときにアニメシーを感じる、と解釈できる。これらの先行研究は、アニメシー知覚が動きに対する予測誤差 (動きを x としたとき、 ε_x) によって引き起こされていること、すなわちベイズ的な統計推論の過程で生じていることを示唆しているといえる。本研究では、このアイデアをもとにアニメシー知覚のモデルを提案し、その妥当性を実験によって検証した。次節ではモデルの詳細について説明する。

2.1 アニメシー知覚の数理モデル

本研究では、アニメシー知覚が、対象の動きの情報から、その動きを生み出すに至った隠れた原因である意図や感情といった生物らしさをベイズ的に推定する過程で生じると考える。そこで、動きの情報から意図や感情の情報が抽出されるような情報処理過程を考える。

まず、視覚的な動きの情報は 5 次視覚野 (V5/MT 野) で処理され、そこでは動きの方向と速度が符号化されていることが知られている。ここで、意図や感情の情報はこの動きの方向や速度の情報から直接抽出されるものではなく、階層的な神経回路上で徐々に情報が処理された末に抽出されるものと仮定した。これは、動きの情報処理をする脳部位 (MT, STS) と意図の情報を処理する脳部位 (mPFC) をつなぐ階層的予測符号化ネットワークの存在が示唆されている [14] ことに基づく仮定である。そこで、動きの方向から抽出され、意図に繋がる情報として、「動きの目標が存在する方向」をベイズ的に推定していると仮定する。すなわち、人は対象の意図を推定するために、動きの情報を処理する層と意図の情報を処理する層を繋ぐような階層的予測符号化ネットワークを有しており、動きの方向の情報をもとに、まず、この動きがどこを目指しているのかを推定している、と仮定する。この仮定は、運動の目標指向性の検出が乳児すなわち発達初期の段階でも可能であること [15][16]、点の動きの目標の表示の仕方によってアニメシーの評価が異なること [4][17] などに基づいている。

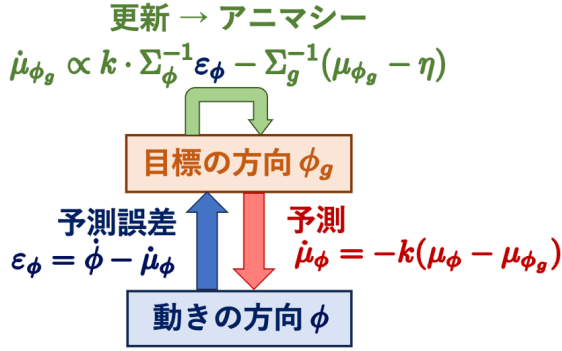


図 1: アニマシー知覚のモデルの概念図

ここで、動きの方角 ϕ が、動きの目標が存在する方向 ϕ_g に向かって次第に収束していくというモデルを脳が学習していると仮定する。すなわち、

$$\dot{\phi} = -k(\phi - \phi_g) + \omega_{\phi}$$

が成り立つとする。さらに、目標の方角とその不確実性が既知であるとする。すなわち、

$$\phi_g \sim \mathcal{N}(\eta, \Sigma_g)$$

であるとする。このとき、目標の方角に対する推定値の更新は、

$$\dot{\mu}_{\phi_g} \propto k \cdot \Sigma_{\phi}^{-1} \varepsilon_{\phi} - \Sigma_g^{-1} (\mu_{\phi_g} - \eta)$$

となる。この更新式は、目標の方角に対する推論が、動きの方角に対する予測誤差 ε_{ϕ} と、目標の方角に対する事前の予測の不確実性 Σ_g に依存することを示している。先行研究では、動きの角度変化が大きいほど、すなわち動きの方角に対する予測誤差が大きいほど、アニマシーが強まることを示唆する結果が得られている [3][4]。また、動きの目標の表示の有無等によって、アニマシーの強さが変化することが知られている [4][17]。アニマシーの強さが、対象に対して感じる意図性や自律性の強さと相関する指標であること [18] を踏まえて、意図性や自律性の強さが目標の方角に対する推論の更新量の大きさに関連していると仮定すると、このモデルと先行研究の結果はよく一致する。さらに、この階層的な推論のモデルは、アニマシー知覚が対象の動きの情報をボトムアップの知覚とトップダウンの推論の相互作用で処理する中で生じるとした前述の Gao et al. [9] のモデルと整合的である。モデルの概念図を図 1 に示す。

このモデルの妥当性を実験で検証するために、目標の方角の推論とアニマシー知覚の関連性が明確になるような実験刺激を作成し、その刺激に対応したアニマシーの強さを表現する計算論モデルを導出する必要がある。そこで本研究では、

多少のゆらぎを持ちながらある目標に向かって等速で移動し、途中で目標を切り替えて同じ速度で進んでいく

という動きに対して、アニマシー知覚の大きさを予測するモデルを導出することにする。

まず、ある程度のゆらぎを持ちながらある目標に向かって移動していく過程で、脳は動きの方向の変化に対する予測と、目標の方角に対する予測を立てる。この時点での目標の方角に対する予測は、正規分布 $p(\phi_g) = \mathcal{N}(\eta_{\text{before}}, \Sigma_{g,\text{before}})$ で書けるとする。その後、目標を切り替えて移動していくが、切り替え後の目標の予測の分布も正規分布 $p(\phi_g) = \mathcal{N}(\eta_{\text{after}}, \Sigma_{g,\text{after}})$ で書けるとする。

意図性と自律性の強さは、目標の方角に対する分布がどれだけ動かされたのかに比例すると仮定する。事前分布 $p(\phi_g) = \mathcal{N}(\eta_{\text{before}}, \Sigma_{g,\text{before}})$ が $p(\phi_g) = \mathcal{N}(\eta_{\text{after}}, \Sigma_{g,\text{after}})$ という分布からの観測によって更新されるとき、分布の期待値の瞬間の更新量 $\Delta\mu_{\phi_g}$ は

$$\Delta\mu_{\phi_g} = \frac{\Sigma_{g,\text{before}}}{\Sigma_{g,\text{before}} + \Sigma_{g,\text{after}}} (\eta_{\text{after}} - \eta_{\text{before}})$$

となる。これは、目標変更後の分布の分散 $\Sigma_{g,\text{after}}$ の減少関数になっており、目標に向かっている場合にアニマシーが強まるとする Dittrich & Lea [17] および Tremoulet & Feldman [4] の結果と合致している。また、 $\Delta\mu_{\phi_g}$ は目標変更前の目標の方角の分散 $\Sigma_{g,\text{before}}$ の増加関数になっている。これを意図性・自律性の強さに変換した $f(|\Delta\mu_{\phi_g}|)$ が、本研究で使用する実験刺激から生じるアニマシーの強さとなる。

3 方法

本研究では、目標に向かって動いている対象が、途中で目標を変更し、それに伴い進行方向も変化するような場合を対象として、人が仮説通りにアニマシーを知覚するかどうかを実験によって検討する。特に、目標を変更した瞬間の動きの方角の予測誤差および目標の分散と変化がアニマシーに与える影響に注目して分析を行う。

3.1 実験刺激

縦横 640px の黒色正方形の背景の上に、白い円（動点）と 0-3 個の赤い目標点が描かれた動画を実験刺激とした。動点は、正方形の中心に 1.5 秒間静止した後、ある目標に向かって一定の速度 v で動き始め、1 秒後に目標を変更し、再び速度 v で新しい目標に向かって 1 秒間進むように設定した。ただし、「目標に向かって

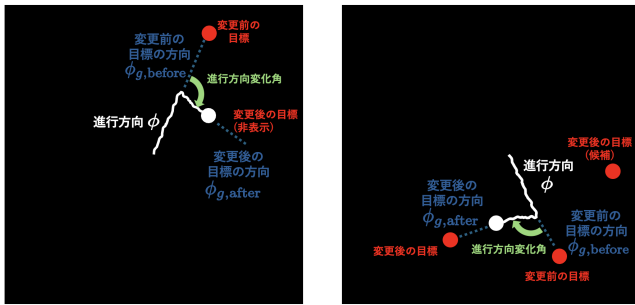


図 2: 実験刺激の模式図

白い点が黒い背景上を動き、目標に向かってゆらぎながら進んでいく。目標点は赤い点として表示されている場合と、表示されていない場合がある。左側の刺激は、変更前の目標のみが表示されており、変更後の目標が表示されていない例である。右側の刺激は、変更前の目標と変更後の目標がともに表示されている例である。文字や矢印、動点の軌跡の線などは、実際の画面には表示されない。

進む」とは、動点の進行方向 ϕ と目標の方向 ϕ_g に対し、次が成り立つことを指す。

$$\frac{\phi(t + \Delta t) - \phi(t)}{\Delta t} = -k(\phi(t) - \phi_g) + \omega_\phi$$

ここで、 $\omega_\phi \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ はホワイトノイズである。本実験では $v = 2$, $k = 24$, $\sigma = 6$, $\Delta t = 1/60$ とした。3.5 秒間の動画中に動点が目標に辿り着くことはなかった。

3.2 実験条件

実験条件として、進行方向の角度変化の大きさ (以下、進行方向変化角)、および目標の表示の有無を設定し、合計 100 本の動画を作成した。進行方向変化角については、 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 80^\circ, 120^\circ$ の 7 通りを設定した。これは動きの方向 ϕ の予測誤差 ε_ϕ に相当する。目標の表示の有無については、変更前および変更後の目標に対して、「表示あり」「表示なし」の組み合わせで 4 通りを設定した。これは目標の方向の不確か性 Σ_g に相当する。 Σ_g が小さい条件が「表示あり」、大きい条件が「表示なし」に相当する。目標変化角 10° - 120° の 6 通りと目標の表示の有無 4 通りの組み合わせで 24 条件があり、さらに変更前の目標の方向 2 通り (水平右方向を 0° とし、反時計回りに $18^\circ, 63^\circ, 108^\circ, 153^\circ, 198^\circ, 243^\circ, 288^\circ, 333^\circ$ の 8 方向からランダムに 2 方向) と曲がる向き 2 通り (左右) の組み合わせで 96 本の動画を作成した。目標変化角 0° に対しては、目標の表示あり/なしの 2 通りと変更前の目標の方向 2 通りの組み合わせで 4 本の動画を作成した。動画例を図 2 に示した。

表 1: 質問紙

質問	評価が低い表現 (評定値=1)	評価が高い表現 (評定値=7)
生物性を感じる	たんたんと	いきいきと
意図性を感じる	あてもなく	何かをめぐして
自律性を感じる	しかたなく	みずからすすんで
途中で目標が変わった	まったく変わっていない	方向が大きく変わった

3.3 実験参加者・手続き

18 歳-39 歳の男女 22 名 (平均年齢 27.6, SD6.9) が実験に参加した。140 種類の動画をそれぞれ 1 回ずつ、ランダムな順序で参加者に提示した。各動画は 1 度のみ視聴可能であった。参加者は各動画の終了後、動点に関する生物性、意図性、自律性、および目標変化角の大きさについて、7 段階の SD 法で評価を行った。質問内容は表 1 に示す。生物性、意図性、自律性の選択肢の表現は細川ら [18] に倣った。

すべての動画に対する評価が終了した後、動点や赤い点を何かに見立てたかについて自由記述形式で回答してもらった。

3.4 分析方法

階層的予測符号化に基づいたアニメシー知覚のモデルの妥当性を検証するため、実験刺激作成時のパラメータ 3 種類 (進行方向変化角、変更前の目標の表示、変更後の目標の表示) と、質問紙の回答データ 4 種類 (目標変化角の回答値、意図性の回答値、自律性の回答値、生物性の回答値) を変数とするパス解析を実施した。パス解析にあたり、すべての変数の平均を 0、分散を 1 にスケール (標準化) した。また、パス解析の構造として、次の 3 点を仮定した。

1. 進行方向変化角は、目標変化角の回答値、意図性の回答値、自律性の回答値、生物性の回答値に影響を与える
2. 変更前の目標の表示、変更後の目標の表示、目標変化角の回答値は、意図性の回答値、自律性の回答値、生物性の回答値に影響を与える
3. 意図性の回答値、自律性の回答値は、生物性の回答値に影響を与える

4 結果

パス解析の結果の概要を図 3 に示す。CFI = 0.984 (> 0.95), RMSEA = 0.050 (< 0.08) であり、モデルの適合度は良好であった。

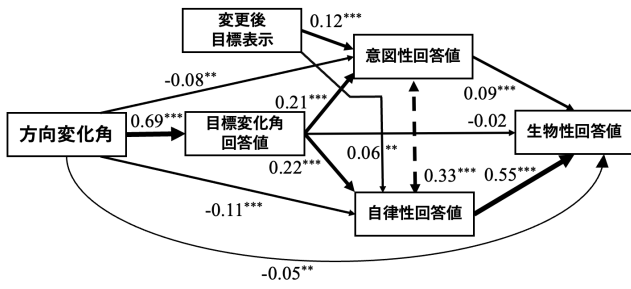


図 3: パス解析の結果

実線矢印は仮定した構造, 破線矢印は相関関係を表す. なお, 本図では変更前の目標の表示は示していない.
 $*p < .05$, $**p < .01$, $***p < .001$ である.

まず, 進行方向変化角は, 目標変化角に対して有意な正の関連を示した ($\beta = 0.69, p < .001$). この結果は, 進行方向が大きく変わるほど, 目標が大きく変わったと認識することを表している. また, 進行方向変化角は意図性, 自律性に対して有意な負の関連を示した (意図性: $\beta = -0.08, p < .01$, 自律性: $\beta = -0.11, p < .001$). 一方で, 生物性に対しては, 有意な関連を示さなかった. これらの結果は, 進行方向の変化が大きいほどアニメシーが強まるとする先行研究の結果 [3][4] と一致していない.

次に, 目標変化角は, 意図性, 自律性に有意な正の関連を示した (意図性: $\beta = 0.21, p < .001$, 自律性: $\beta = 0.22, p < .001$). 一方で, 生物性に対しては有意な関連を示さなかった.

変更前の目標の表示の有無は, 意図性の回答値, 自律性の回答値, 生物性の回答値のいずれの回答値に対しても有意な関連を示さなかった. 変更後の目標の表示の有無は, 意図性, 自律性の回答値に対して有意な正の影響を示した (意図性: $\beta = 0.12, p < .001$, 自律性: $\beta = 0.06, p < .01$). 一方で, 生物性の回答値には有意な影響を示さなかった.

最後に, 意図性と自律性は, 生物性に対して有意な正の関連を示した (意図性: $\beta = 0.09, p < .001$, 自律性: $\beta = 0.55, p < .001$). 特に, 自律性が生物性に与える影響が大きいことが分かる.

以上の結果は, 次の 4 点を示している.

1. 方向変化角が大きいほど, 目標変化角も大きい
2. 目標変化角が大きいほど, 意図性・自律性も強い
3. 変更後の目標の方向の分散が小さいほど, 意図性・自律性も強い
4. 意図性・自律性が強いほど, アニマシーも強い

この結果は, 図 1 に示した, 動きの方向, 動きの目標の方向, 意図性・自律性を繋ぐ階層的予測符号化ネットワークの存在を示唆している. したがって, これまで単一の知覚現象として扱われてきたアニメシー知覚に, 階層的な情報処理構造が内在していることを実験から明らかにすることができたといえる.

5 考察

5.1 パス解析の結果について

まず, 意図性と自律性は, アニマシーに対して有意な正の関連を示した. これは, アニマシーが意図性と自律性からなる複合概念 [18] であることを示唆している. 本実験においては, 自律性がアニメシーに対して与える影響が特に大きいことが明らかとなった.

進行方向変化角の大きさ, すなわち予測誤差 ϵ_ϕ と, 目標の方向の更新量 $\Delta\mu_{\phi_g}$ との間には正の相関が見られた. この結果は, 目標の方向の更新が, 動きの予測誤差に基づいて行われていることを示している.

進行方向変化角の大きさと目標変化角の大きさの回答値は, アニマシーの回答値に対して大きな影響を与えていなかった. 一方で, 自律性と意図性に対しては, 目標変化角の大きさの回答値は有意な正の関連を示していた. この結果は, 目標の方向の更新量 $\Delta\mu_{\phi_g}$ は, アニマシーの強さではなく, アニマシーの構成要素である意図性や自律性の強さに対応していることを示唆している. また, 意図性, 自律性に与える影響が, 目標の方向の更新量 $\Delta\mu_{\phi_g}$ よりも進行方向変化角において小さいことは, 動きの方向と意図を結ぶ予測符号化ネットワークの中間層に, 目標の方向を扱う層が存在する可能性を間接的に示唆している.

本研究で提案したモデルは, 動きの方向変化角 ϵ_ϕ が大きいほど目標変化角が大きく, 目標変化角 $|\eta_{\text{after}} - \eta_{\text{before}}|$ が大きいほど, そして変更前の目標の方向の予測の分散 $\Sigma_{g,\text{before}}$ が大きいほど, 変更後の目標の方向の予測の分散 $\Sigma_{g,\text{after}}$ が小さいほど意図性・自律性が強く, 意図性・自律性が強いほどアニメシーも強い, とするモデルであった. 実験の結果を総合すると, 目標変化角の大きさと, 変更後の目標の方向の分散は, 意図性・自律性の強さに対してモデルの予測通りの影響を与えていた. これらの結果は, アニマシー知覚の階層的予測符号化モデルの妥当性を支持するものであると言える. 一方で, 変更前の目標の方向の予測の分散の影響は確認できなかった. 目標の方向の不確実性 Σ_g を実験刺激に反映させ, Σ_g がアニメシーに与える影響を改めて検証する必要がある. また, 以上の議論は, モデルから予測される定性的な性質についてのものであり, 実験結果とモデルの定量的な整合性を示したものの

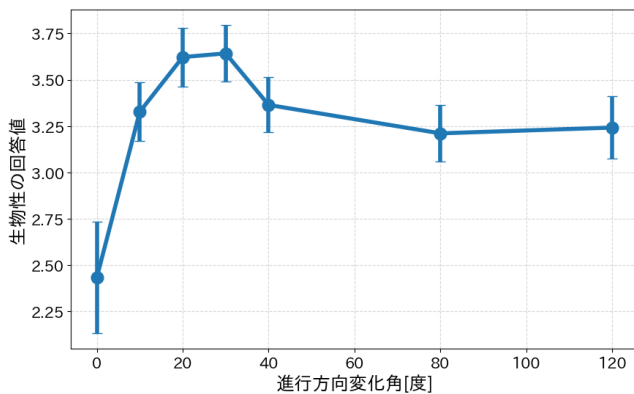


図 4: 進行方向変化角と生物性の回答値の関係

進行方向変化角と生物性の回答値の関係。横軸は進行方向変化角の大きさ、縦軸は横軸の値ごとに計算した生物性の回答値の平均値を示している。エラーバーはその 95% 信頼区間を示している。

ではない。アニメシー知覚のモデルの発展のためには、モデルの定量的な性質についてのさらなる検討が必要となる。

5.2 アニメシー知覚の個人差について

上述の通り、パス解析により変数間の関係性が明らかとなり、動きの方向、動きの目標の方向、意図性・自律性を繋ぐ階層的予測符号化ネットワークの存在が示唆された。一方で、進行方向変化角とアニメシーの強さの間には直接の関係が見られず、先行研究 [3][4] とは大きく異なる結果が得られている。本実験で得られた進行方向変化角の大きさとアニメシーの回答値との間の関係性を図 4 に示す。先行研究と異なり、進行方向変化角が 20° - 30° 付近でアニメシーが最も強まるような、逆 U 字形の関係が見られた。

個人ごとの結果を見ると、逆 U 字形の関係を示す回答者だけでなく、先行研究と同様の単調増加の関係を示す参加者や、進行方向変化角がアニメシーの評価に影響しないと回答する参加者も存在しており、進行方向変化角の大きさとアニメシーの関係性は個人差が大きいことが分かる。この個人差は、個人ごとに思い浮かべた生物種が異なることに起因すると考えられる。

参加者 22 名のうち 16 名は、実在する具体的な生物を想起し、その動きと比較して生き物らしさを判断していたと回答した。「点の動きはコンピュータで作られており、実際の生き物の動きは参考にしていません」と教示したにもかかわらず具体的な生物を想起する参加者が多いという事実は、動きを生み出す原因、すなわち意図や具体的な生物種を人が積極的に推定する傾向

にあることを示している。

また、人は実在する生物の運動の物理量に極めて近い動作に対してセンシティブにアニメシーを感じるということが知られている [19][20]。想起した特定の生物として無理がある動き、たとえば突然急角度で方向を変えるような動きをした場合には、その特定の生物らしさが低下し、アニメシーを低く評価するようになる可能性が考えられる。たとえば、ヘビが地面を這いながら 120° 程度の方向転換をする様子は想像できるが、ハトが飛行中に突然大きく方向転換する様子は想像できない。

図 5 に、想起した生物種と回答の傾向の間の関係を示す。点の動きがミミズやヘビのように見えたときと回答した 2 名だけが、進行方向変化角が大きいほどアニメシーが強いと評価しており、大きな翼を持つ生き物 (ハト, チョウ) に見えたときと回答した 2 名の評価はともに逆 U 字形の関係を示していることが分かる。また、アリに見えたときと回答した 3 名の評価はいずれも、進行方向変化角が 30° のときにアニメシーが最も強くなるような逆 U 字形の関係を示している。これらの結果は、基本的には進行方向変化角が大きいほど目標変化角も大きく、その結果アニメシーの構成要素である意図性や自律性が高く感じられるものの、想起した生物の動きとして有り得ないような角度変化は、アニメシーの評価を低下させることを示唆している。単純な外見を持つ対象の動きから感じるアニメシー知覚における個人差は、先行研究ではあまり注目されてこなかったが、今後の研究でさらなる検討が必要である。

6 結論

実験の結果、目標の方向の更新が動きの予測誤差に基づいて行われていること、また、動点の目標方向の更新量 $\Delta\mu_{\phi_g}$ がアニメシーの構成要素である意図性や自律性の強さに対応している可能性が示唆された。進行方向変化角が意図性や自律性に与える影響が比較的小さいことを併せると、動きの方向と意図を結ぶ予測符号化ネットワークの中間層に、目標の方向を扱う層が存在する可能性が示唆されたといえる。アニメシーが動きの情報そのものからではなく、動きの目標の方向の推論過程で知覚されている可能性を数理的理論と実験によって明らかにした点が、本研究の新規性である。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (JST CREST) 「文脈と解釈の同時推定に基づく相互理解コンピューテーションの実現」(課題番号: MJCR19A1) の助成を受けたものです。

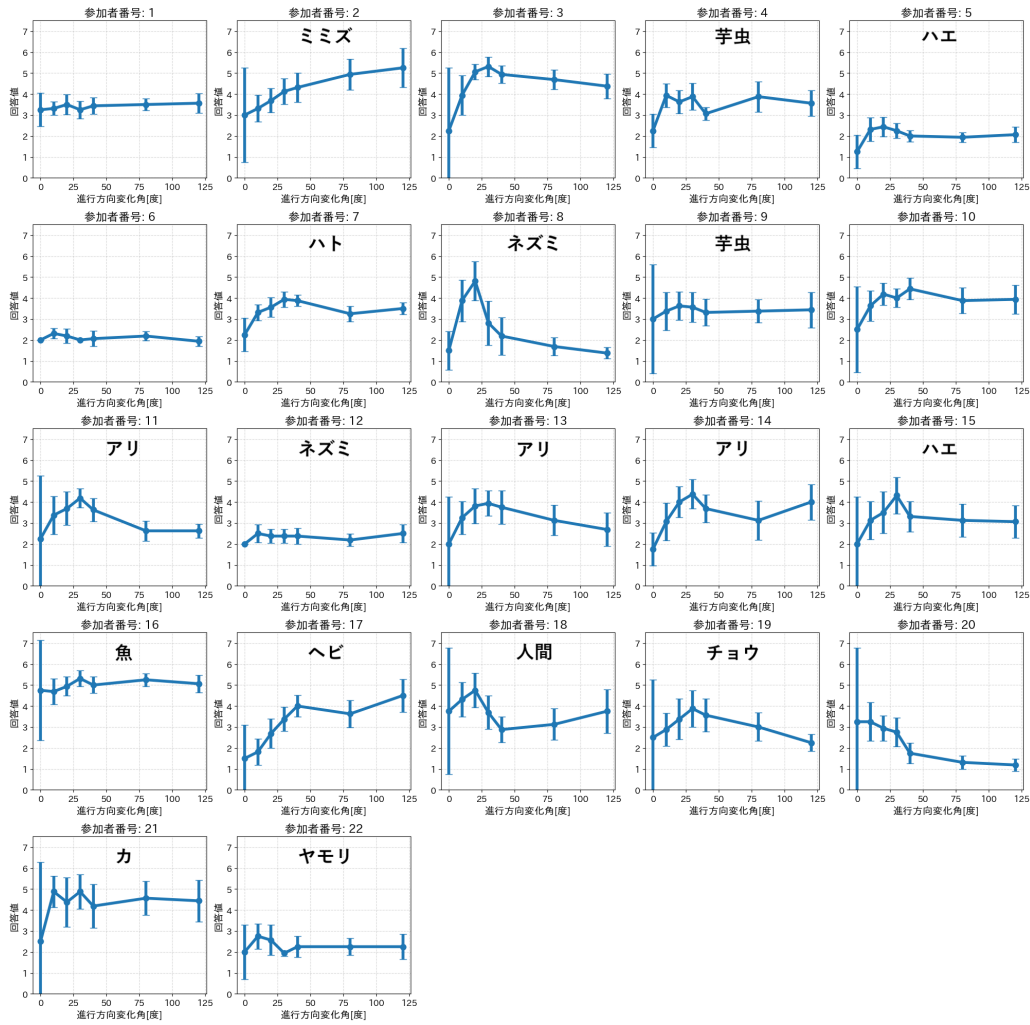


図 5: 進行方向変化角と生物性の回答値の個人ごとの関係

各グラフの横軸は進行方向変化角の大きさ、縦軸は横軸の値ごとに計算した生物性の回答値の平均値を示している。エラーバーはその 95%信頼区間を示している。グラフ内に参加者が想起した生物種を記載している。

参考文献

- [1] Schultz, J., & Frith, C. D. (2022). Animacy and the prediction of behaviour. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 140, 104766.
- [2] Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Interacting minds—a biological basis. *Science*, 286(5445), 1692–1695.
- [3] Tremoulet, P. D., & Feldman, J. (2000). Perception of animacy from the motion of a single object. *Perception*, 29(8), 943–951.
- [4] Tremoulet, P. D., & Feldman, J. (2006). The influence of spatial context and the role of intentionality in the interpretation of animacy from motion. *Perception & psychophysics*, 68, 1047–1058.
- [5] Fukai, H., & Terada, K. (2013). Modeling of animal movement by ar process and effect of predictability of the behavior on perception of animacy and intentionality. In *2013 35th annual international conference of the ieee engineering in medicine and biology society (embc)* (pp. 4125–4128).
- [6] Fukuda, H., & Ueda, K. (2010). Interaction with a moving object affects one’s perception of its animacy. *International Journal of Social Robotics*, 2, 187–193.

- [7] Szego, P. A., & Rutherford, M. D. (2008). Dissociating the perception of speed and the perception of animacy: A functional approach. *Evolution and Human Behavior*, 29(5), 335–342.
- [8] Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature reviews neuroscience*, 11(2), 127–138.
- [9] Gao, T., Baker, C. L., Tang, N., Xu, H., & Tenenbaum, J. B. (2019). The cognitive architecture of perceived animacy: Intention, attention, and memory. *Cognitive science*, 43(8), e12775.
- [10] Rauss, K., & Pourtois, G. (2013). What is bottom-up and what is top-down in predictive coding? *Frontiers in psychology*, 4, 276.
- [11] Friston, K. (2008). Hierarchical models in the brain. *PLoS computational biology*, 4(11), e1000211.
- [12] Rao, R. P., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature neuroscience*, 2(1), 79–87.
- [13] Baker, C. L., Jara-Ettinger, J., Saxe, R., & Tenenbaum, J. B. (2017). Rational quantitative attribution of beliefs, desires and percepts in human mentalizing. *Nature Human Behaviour*, 1(4), 0064.
- [14] van Pelt, S., Heil, L., Kwisthout, J., Ondobaka, S., van Rooij, I., & Bekkering, H. (2016). Beta-and gamma-band activity reflect predictive coding in the processing of causal events. *Social cognitive and affective neuroscience*, 11(6), 973–980.
- [15] Woodward, A. L. (2005). The infant origins of intentional understanding. In *Advances in child development and behavior* (Vol. 33, pp. 229–262). Elsevier.
- [16] Kanakogi, Y., & Itakura, S. (2011). Developmental correspondence between action prediction and motor ability in early infancy. *Nature communications*, 2(1), 341.
- [17] Dittrich, W. H., & Lea, S. E. (1994). Visual perception of intentional motion. *Perception*, 23(3), 253–268.
- [18] 細川敦司, 日高昇平, 鳥居拓馬. (2024). アニマシー知覚と動きの統計量の分析: 生物性・意図性・自律性の関係. 日本認知科学会第 40 回大会論文集.
- [19] 青野直也・森田寿郎・植田一博 (2012). 2 リンク機構の運動から知覚される生物性の解析. 『電子情報通信学会和文論文誌 D』, J95-D(5), 1268-1275.
- [20] Schultz, J., & Bühlhoff, H. H. (2013). Parametric animacy percept evoked by a single moving dot mimicking natural stimuli. *Journal of vision*, 13(4), 15–15.