

規則の適用と誤用: 自律的に戦略を変えるランダムサーチのモデル

Following and misunderstanding a rule: autonomous change of strategy shown by a model of random search

村上 久^{*1}
Hisashi Murakami

郡司 ペギオ幸夫^{*1}
Pegio-Yukio Gunji

^{*1} 神戸大学理学部地球惑星科学科
Department of Earth & Planetary Sciences, Kobe University #1

Recent development of empirical research by mean of GPS has shown that animals can change their foraging pattern depending on internal and/or environmental context. In particular, if prey density changes from lower to higher some animal movement is obviously changed from Lévy-type to Brownian-type, rather than to obey just a certain distribution. In this paper, we started with the simple model that possesses the principal features of an intermittent strategy with a rule to switch between two phases, but it could misunderstand this rule, i.e., agent follows an ambiguous switching rule. We showed our model could reveal optimal change of strategy from Brownian-type to Lévy-type depending on the prey density, investigating the distribution of time interval to switch the phases, and discussed how power-law distribution in our model could emerge.

1. はじめに

捕食行動を行う動物は探索パターンを内的/外的な文脈に依存して変化できることが予測されてきたが、そのデータが得られるようになったのは近年になってからである[Humphries NE 2010]。特に獲物の分布密度の変化に伴い、探索戦略をレヴィ的なものからブラウニアン的なものまで変化させることが示された[López-López P 2013]。しかしながら自律的に探索戦略を切り替えるモデルはまだない。我々は断続モデル(二つの相を持ち、それらを切り替える探索モデル)の特徴を持つが切り替え規則の誤認識を取り入れたモデルを提案している[Murakami 2013]。本研究では、このモデルが実測データと一致して獲物の密度に依存した探索戦略の変化を見せることを示す。また、獲物の分布が低密度である時にこのモデルの長距離ステップ幅が見せるべき分布がどのように生まれ得るかを議論する。

2. 結果

2.1 モデル

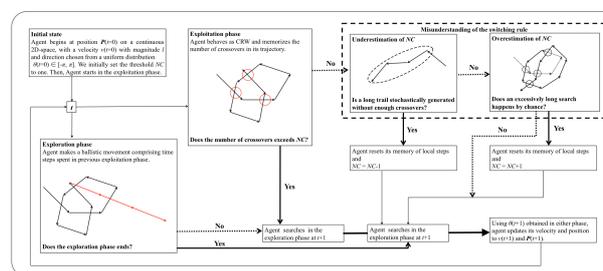
ここではモデルの概要を説明する。詳しくは[Murakami 2013]を参照のこと。第一に、エージェントが規則に基づいて二つの相を切り替えることによって得られる挙動について。第二にその切り替え規則の誤認識について。

本モデルでは断続モデルが持つ二つの主要な特徴を取り入れた。一つ目は局所的で念入りな探索であり、ここでは exploitation phase と呼ぶことにする。二つ目は他の場所への移動を含意する探索であり、ここでは exploration phase と呼ぶことにする。exploitation phase では基本的にエージェントは相関ランダムウォーク(CRW)として振る舞う。ここで CRW とは、ステップ幅 l を持ち(ここでは $l=0.5$)、次ステップの変異角が、周期的正規分布($-1.0 < g < 1.0$; $g=0$ で最大確率)で与えられるモデルである[Bartumeus F 2008]。動物の局所探索のモデルとして広く利用され、直進性を有し、その程度は正規分布の標準偏差(SD)で与えられる。断続モデルでは局所探索が終了するたび

に他のえさ場への移動を行う。通常この切り替えは確率過程をもとに行われるが、我々のモデルでは探索程度を表すためにエージェントの軌道履歴が作る交差回数を採用する。ただし、記憶の有限性を考慮し 10 ステップの軌道履歴しか記憶できないとする。つまり交差回数が交差閾値 NC を超えるとき、エージェントは相を切り替える。その後 exploitation phase では、直前の exploitation phase を行った時間に比例した時間、弾道軌道を行う。その後、軌道履歴をリセットし、再び exploitation phase へ移る。ここまでのモデルの挙動は、[Murakami 2013]で調べられた。ここでは $SD=0.2$ とする。

さて、次に切り替え規則の誤認識について説明する。我々のモデルでは二種類の誤認識によって交差閾値 NC が絶えず変えられ、それによって探索戦略を動的に変える。一つ目は交差閾値を超える前に確率的に得られたロングトレイル(前後の相関が 0.8 以上の 15 ステップ以上のトレイル)で、局所探索の過小評価を招き NC は減少する。次に相の切り替え無しに 500 ステップ以上を費やした時、局所探索の過大評価を招き NC は増大する。

Figure 1

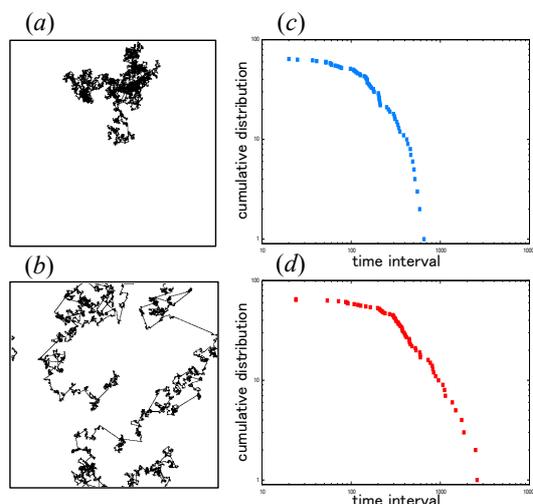


2.2 自律的な探索戦略の変化

ここでは密度の異なる二つの餌分布におけるモデルの挙動を調べる。餌は距離 λ で配置され、 λ が餌密度を決定する。 $\lambda=3$ を高密度 $\lambda=10$ を低密度とした。エージェントはステップ幅 l の 2 倍の半径を持つ発見可能範囲に侵入するとターゲットを獲得できる。またその際に交差回数をリセットする。figure 2ab はそれぞれ高密度、低密度時のモデルの 30000 ステップ後のスナップショットを表示している。高密度において、エージェント

は頻繁に餌を獲得し、そのため局所探索における過大評価に関する誤認識が行われにくく、 NC は低い値で維持されやすい。低い NC により、エージェントは局所探索に終始し、結果としてブラウニアン的挙動を示す。低密度において、エージェントが餌を獲得することは稀で、そのため局所探索における誤認識が頻繁におこり、 NC は絶えず変動する。多様な NC は多様な exploration phase において多様な長さのロングトレイルを生み、レヴィ的挙動を実現する(次節で詳しく議論する)。figure 2dc ではそれぞれ高密度、低密度時の exploration phase でのロングトレイル長さの分布を示している。高密度時では指数関数的に減衰している(赤池情報量基準; 冪対指数, $N=44$, $\mu=2.45$, $\lambda=0.0023$, $w_p=1.0$, $w_{exp}=0.0$) 対して、低密度ではべき関数的な減衰を示した($N=44$, $\mu=2.43$, $\lambda=0.0063$, $w_p=0.93$, $w_{exp}=0.07$)。

Figure 2



2.3 混合分布としての冪分布

ここではどのように我々のモデルの冪分布が現れるが議論する。[Maye A 2007]によるとコックス過程(合成ポアソン過程)から得られる頻度分布は冪則を示し得ることが知られており、ハチの探索においてコックス分布としての冪則が議論されている。我々のモデルにおいても様々な NC の値が生む様々な長さのロングステップの合成として冪則が得られているのではないか。これを調べるために figure 3 では餌が配置されていない空間におけるロングトレイルの長さ分布(a)、 NC の順序を強制的に入れ替えて生み出される分布(b)、そのときの NC の割合(c)、 $NC=1$ と $NC>1$ それぞれにおけるロングトレイルの長さ分布を分離して表示したもの(d)を示した。figure 3ab 両方で冪則が得られた。figure 3d はここで得られた冪則のテイル部分が $NC>1$ によって、それ以外の部分が $NC=1$ によって生み出されていることを示している。

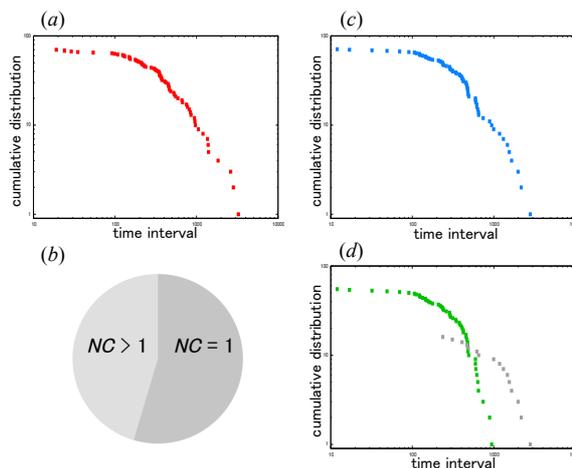
3. おわりに

今回我々は探索モデルにおいて、切り替え規則の誤認識を組み込んだ。エージェントはそれによって局所探索の基準となる交差閾値 NC を絶えず変化させることが可能である。 NC が変化可能であるが故にエージェントは、環境の変化に対して開かれており、実際に密度の異なる環境において違った振る舞いを示す。この結果は[López- López P 2013]で見られたような実際の動物の探索と整合的である。また figure 3 で得られた結果は、動物の探索における冪則がさまざまな分布の合成から得られる

こと、ひいてはステップ幅の基準の多様な変化から得られることを示唆している。

動物の探索パターンで見られるロングトレイルで結ばれる局所クラスターは、探索のための規則の存在を示唆している。我々のモデルはこのような規則に誤認識を導入した初めてのモデルである。動物の探索は環境に対して非常に融通がきくことが知られるが、これは規則に従う事とそれを誤認識することによって得られるのではないだろうか。

Figure 3



参考文献

[Humphries NE 2010] Queiroz N, Dyer JRM, Pade NG, Musyl MK, et al.: Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators, *Nature* **465**, 1066–1069.

[López- López P 2013] Benavent-Corai L, García-Ripollés C, Urios V. Scavengers on the move: behavioural changes in foraging search patterns during the annual cycle. *PLoS ONE* **8**, e54352.

[Murakami 2013] Gunji YP. Lévy-like Distribution Shown by Intermittent Search Model with Misunderstanding Switch Pattern. *Advances in Artificial Life (Lió, P. et al. eds.)*. 492-497.

[Bartumeus F 2008] Levin SA. Fractal reorientation clocks: Linking animal behavior to statistical patterns of search. *PNAS* **105(49)**, 19072–19077.

[Maye A 2007] Hsieh C, Sugihara G, Brembs B. Order in Spontaneous Behavior. *PLoS ONE* **5**, e443.