

# 誘引-忌避の両義性からなる群れと探索・搾取のジレンマ

## The Dilemma between Exploring and Exploiting of Collective Agents in an Asynchronous Interaction

新里 高行\*1  
Niizato Takayuki

\*1 筑波大学システム情報工学研究科  
Faculty of Engineering, Information and Systems, Tsukuba University

To understand various collective behaviors, we propose the multiplicity of interaction to each agent. Each agent has a passive phase and an active phase. These two phases are determined by asynchronous updating. Using the discrepancy between learning (passive) and recalling (active), agents in our model show a flexible and multiple collective behaviors such as searching, making signs and collective cognition. Our approach provides a new tool to understand the internal measurement, including such as self-organization, from the collective perspective.

### 1. はじめに

集団における創発の多様性や柔軟性を捉えるにはどうしたらいいだろうか？全体は部分の総和以上のものである、という時、自己組織化理論の文脈ではどれほどそのテーゼをまっとうできているといえるだろうか。自己組織化理論では、集団での多様な振る舞いを見るとき、我々は、個体同士の単純な振る舞いや相互作用によって全体現象をとらえようとする [Couzin, 2009; Sumpter, 2006]。しかし、一般に当のさまざまな集団現象には、それぞれ異なる相互作用が用意され、考察されている。ところが、「いかに多様な集団現象が生じたか」と問う場合、ある特定の相互作用がどれだけの潜在的な多義性を持ち得ているか、ということが問題になる。つまり、細かな相互作用として分化する前の、未分化な相互作用を捉える必要があるのではないか。

ここでは、未分化な相互作用(潜在的に多様な意味を持ち得るような相互作用)の例として、非同期更新のモデルを提案する。我々の提案するモデルの相互作用は、徹底的に不定であるが故に、環境によってさまざまな解釈を可能にする。本稿では、このような着想のもとに得られたモデルが、空間の探索を可能にし、一見それと相反するよう見える縄張り、もしくは、境界作成が両立する事を示す。最後に、集団認知の可能性について議論する。場所を解釈することと、それを使うというレベルの違う働きを各エージェントが担うことは、まさに内部観測の理論の根幹に関わるものである、多様な集団現象を理解するとき、重要な役割を果たす事が明らかになるだろう。

### 2. モデル

ここではモデルのアルゴリズムについて触れる。詳細は [Niizato, 2013] に記してあるので、ここでは主要となる概念を中心に解説する。ここでは離散的な空間を仮定する。さらに、各個体は匂いを持ち、確率的に SITE 間を移動し、通った場所に匂いを残すとす [Cornforth and Green, 2003; Giuggioli et al., 2011; Lewis and Murray, 1993]。この匂いは一定時間持続した後、消える。SITE における状態は全部で3パターンあり、それぞれ、空、匂い付き、障害物に分類される。他に、特別な状態として占有状態があるが、これは後にいうように、受動相でのみ有効である。

各エージェントは非同期に(正確には密度が高い順に)、運動するが、ここで更新の仕方は2パターンある。一つは、受動相であり、エージェントが運動するときすでに近傍にほかのエージェントが数匹存在する場合をさす。このとき、エージェントは占有状態にある SITE を障害物 SITE として学習し、重みに依存して次の SITE を確率的に決定する。つまり、受動相は状態の記憶/解釈に当たる。

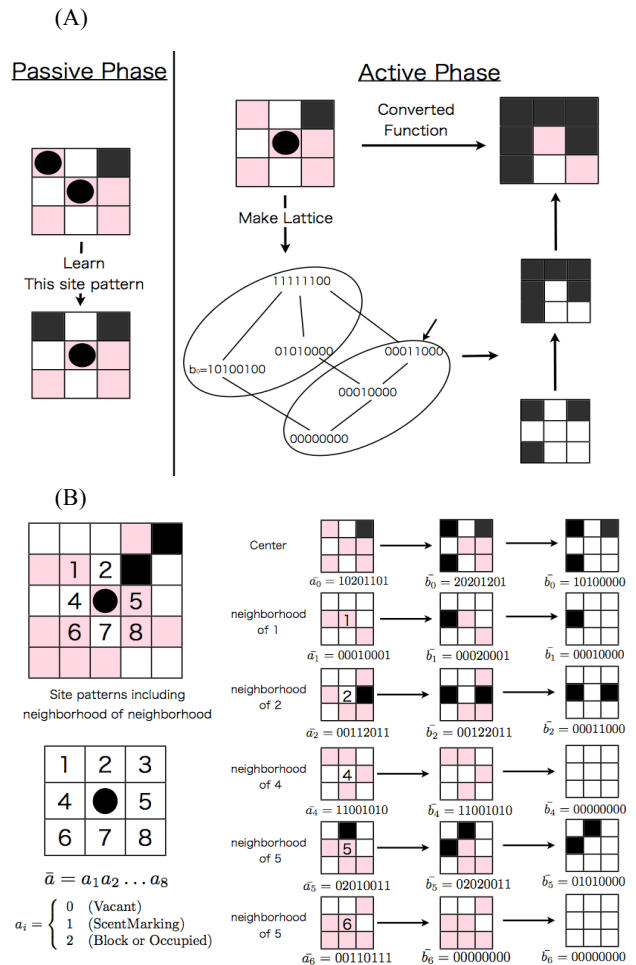


Figure 1. (A) Algorithm of a passive phase (Left) and active phase (Right). (B) The detail algorithm of an active phase. Each

E-mail: t\_niizato@yahoo.co.jp

agent in an active phase takes account into his neighborhood of neighborhood except block sites. We also describe the way of changing bitstrings.

一方、もし近傍のどの SITE も占有状態にないとき、個体は与えられた近傍に対して、記憶した状態に変換する。このとき、個体の近傍の近傍についても同じような操作を行う。近傍の近傍とは、言うならば、1step 後もしくは 1step 前の状態をさすため、近傍の近傍を見る事は、未来もしくは過去の状態を考慮に入れるという事を意味する(Figure 1A)。ここで、各近傍に対して、数字を割り当てれば3bit 列が9つ得られる。これを二値変換する。これにより、順序集合を構成し、DM 完備化を用いて束を作る [Davey and Priestelely, 2005]。つまり、時間的な内容を構造化する事になる。次に、束の要素をランダムに選び、その要素をもとに合同(束上の同値類)を構成し [Gunji et al., 2006; Niizato and Gunji, 2013]、現在にあたる状態に含まれる同値類の最大元を能動相は採用する事になる(Figure 1A)。

ここから分かるように、受動層と能動相はあきらかに性質が異なる (Figure 1B)。受動層は、いわばあるパターンを要素として記憶するのに対し、能動相は記憶したパターンを集合として想起する。そして、この二つの相互作用は、エージェントが同時に動けない事、つまり、非同期性に起因しているのであった。能動相と受動層間のレベルの違いは、状態を解釈することと解釈を使用する事が本質的に異なる作業である事を意味し、各個体はこのレベルの違いを調停するものとして扱われる。非同期性の重要さはいままでもさまざまな研究がなされてきた [Cornforth and Green, 2003; Cornforth et al., 2005]。単純なセルオートマトン更新順序を変更するだけで、その振る舞いを大きく変える [Cornforth et al., 2005]。我々は、のちにレベルの違いによる解釈の多義性が、さまざまな種類の集団現象を実現する事を確認する事になるだろう。

### 3. 結果

#### 3.1 環境と探索

上記のように設定した能動相と受動相の差異により、エージェントたちは、最初は一カ所に集まろうとするものの、次第に空間全域に分布しようとする(ここでは空間の広さは  $30 \times 30$  かつ個体数を 100 とした)。これは、密度が高くなる事で、学習が促進され、密度の高い領域を避けようとする個体が現れることによる。もちろん、このような学習でさえ、数ステップ後の近傍の状態により柔軟に変化していく。全体としてみると、エージェントたちは明らかにあたえられた空間において、群れを作りながら(ここでは群れは匂いによって繋がれた個体たちを意味する)、探索していると考えられる。しかし、このような探索機能も、環境が不均質になったとき状況は一変する。

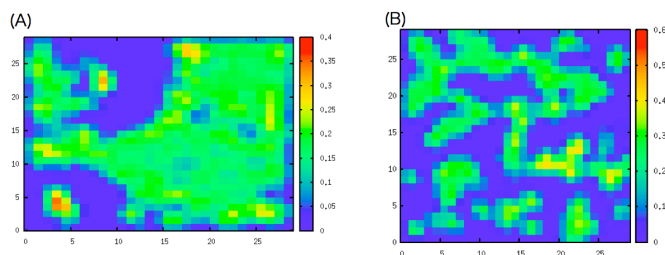


Figure 2 (A) The averaged density distribution of agent in 1,000 steps. It can be observed that agents search all over spaces. (B) The averaged density distribution when blocks randomly distributed in a given space.

#### 3.2 忌避の記号生成

障害物をランダムに空間上に散布したとき、エージェントたちは空間中を探索することはせず、小さな群れを作り出すことが確認されたのである。つまり、環境に依存して、本モデルのエージェントたちは、質的に振る舞いを変えることがわかる。この違いは Figure 2B を見れば明らかであろう。このことをくわしく調べるため、Figure 3A のような環境を設定した。境界条件は反射的に設定し、その中心に入り込めないブロックを各点置きに配置し、その間に半永久的に続く匂いを配置した。つまり、エージェントたちは、誘引と忌避といった、二つの相反する状況におかれる事になる。このような環境下にあつて、エージェントたちはどのように振る舞うのだろうか? Figure 3B はその結果である。図より、明らかに中心付近のエージェントの確率密度が低下している事がわかる。エージェントたちは、Figure 2A で見たように、密度効果により空間全域に広がるようにする。そして、次第に匂いのついて中心エリアにも集まろうとするが、障害物の存在と中心付近の密度の増加により、障害物付近に対する忌避が促進され、その場によりつきにくくなる。

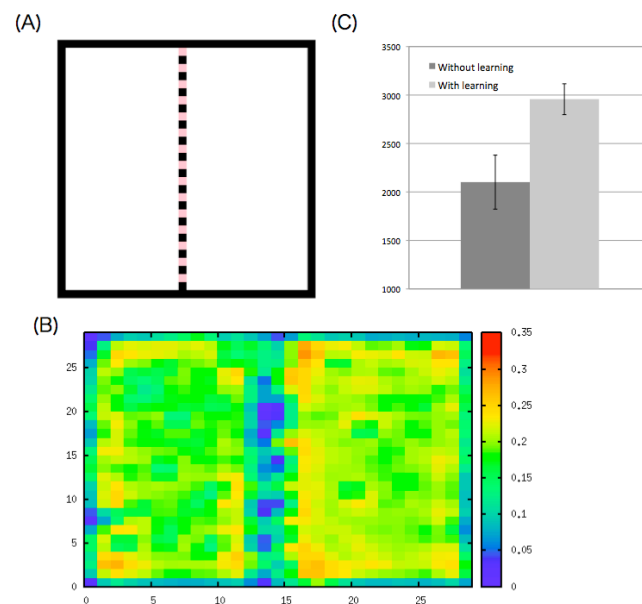


Figure 3. (A) Figure of an environment setting. At the center of the space, blocks and scent makings are distributed alternatively. (B) The averaged density distribution in 1,000 steps. The density is low around the center. (C) The comparison between agent with learning (light gray) and without learning (gray).

対照実験として、受動相のときに近傍の状態を学習しないケースを考えてみよう。このとき、中心付近では学習が行なわれないため、エージェントたちは最終的に中心付近に収束していく。この差は、各エージェントの最長滞在時間の平均をとれば明らかになる。Figure 3C はその結果である。明らかに、学習なし(コ

ントロール)に比べて、学習ありのほうが約 1000 ステップ近く長く片方の領域にとどまっていることがわかる。この結果と Figure 3B のエージェントの散布状態を考慮に入れると、明らかにエージェントたちは中心付近を忌避の記号として認識しており、記号化の萌芽が見られる。ここで行なわれた忌避記号による分離は、障害物が存在しない均質な環境で見せた探索運動とは全くことなる挙動であるといえる。一方は、できるだけ広がる行動にたいし、もう一方はそれを制限することにあたるから。非同期モデルは、受動相と能動相がつくる解釈の多義性により、状況に応じて異なる集団的な振る舞いを生じうる事がわかる。

### 3.3 集団認知

最後に、環境が時間的に変化するケースを考える。今回は中央に障害物をもうけ、この個数が時間的に徐々に変化して行くとする。このとき二つのケースが考えられる。障害物が徐々に減って行くケースと増えて行くケースである。直感的に、ものの出現と消滅は、現象において性質が本質的に異なる。というのも、最初に壁があって徐々に消えて行く場合は、壁の向こう側のエージェントとの接触が問題になるし、壁が徐々に増えて行く場合は、現れた障害物を同解釈するかが問題となるからである。つまり、一方では壁というタイプの消滅であるが、もう一方は数個の障害物のトークンの生成を意味しているからである。このような現象の性質の違いは、エージェントたちの集団の振る舞い方に影響を与えるはずである。

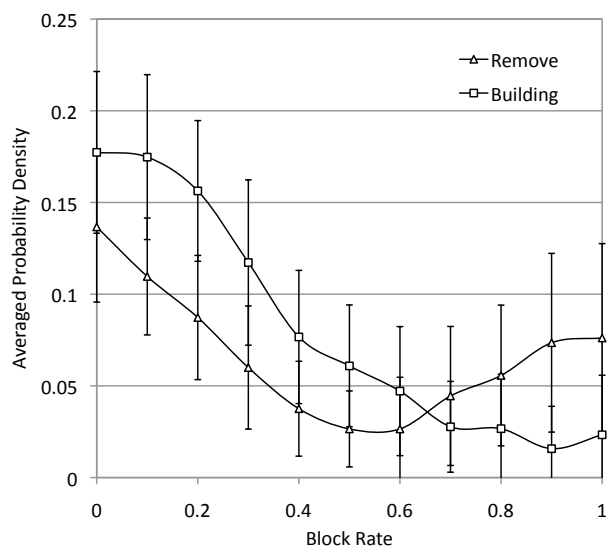


Figure 4. The transition of density probability around the center with block rate. The triangle corresponds removing blocks with time and the rectangle corresponds adding blocks with time.

Figure 4 は障害物が徐々に増えていくときと減って行く時の中心付近の確率密度の遷移を表したものである。障害物は 1000 ステップごとに 10%づつ増減していきとした。図から分かるように障害物の増減の間には非対称的な遷移関係が確認された。まず、徐々に障害物が添加されていく場合、確率密度はゆっくりと減衰していく。これは、忌避記号の生成でみたように密度増加による学習が促進されていくためである。一方で、障害物を徐々に取り除いて行くとき、Block rate が 0.5 ほどになっても、確率密度がずっと小さいままをたもっている。これは、障害物を壁というタイプとして認識するか、あくまで障害物の集まりと

いったようにトークンとして認知するかとの差が全体の振る舞いに影響を与えていることが見て取れる。このような非対称的な構造は、Haken(1983)のシナジェティクスなどに起源をみることができる。この意味において、エージェントたちは、時間変化する環境に対する集団的認知が示唆するという結果を得た。

### 4. おわりに

内部観測は従来、さまざまな解釈を有するものの、その本質には対象を同定する事の不完全性や不定性を軸に展開されてきた観測理論であるといっている [Gunji et al., 2006; Matsuno, 1991]. Matsuno は観測対象の観測と時間の有限性をしているし、Gunji らは、観測対象に伴う実在論を批判している。両者に共通する点は、対象や概念といったものが、あくまで括弧付きのものでしか語れないにもかかわらず、一種の実在性をもって指定されてしまう事態をどう理解するか、という点にある。対象の同定が留保を伴ったものであると考えるとき、それを我々は極限としての指示性(全体)と具体性としての指示性(部分)の絶え間ない相互作用をもってでしか語る事はできない。本稿を通じて我々が主張してきた不定性をもった相互作用を考えることは、まさに、対象の同定の不完全性を考えることにあたる。それは、タイプとトークンの両義性、未分化な相互作用がそのつど分化していく描像である。

概念や対象が括弧つきであると具体的にどのようなことだろうか。最近 Nature で、つぎのような論文があった。犬はオオカミを家畜化したものであると知られているが、Axelsson は犬の食べるものと人間の食べるものの消化機能の類似性から、犬は人間の食べ残しを食べる事で餌付けされたのではないかと、という [Axelsson et al., 2013]. つまり、犬の家畜化はなんらかの強制を伴うものではなく、もともと食べ物を通じて緩いつながりがあった事を示唆している。ここに、我々はひとつの不定な相互作用の例を見る事ができる。そもそも、人間の食事の残飯=ゴミと犬のゴミ=食べ物はあくまで独立に想定される因果列にすぎない。ところが、ここに、人間と犬の間に餌をあげている=餌をくれるという文脈が見出されたとき、食べ残し=餌となり、野生の犬(オオカミ)を飼いならすという新たな状態が創出する。ここに、我々は相互作用が本質的に不定である故に、他者とわたし、もしくは、無関係な因果列同士を接続しうるインターフェースの可能性を見るのである。

本稿では、ある一つの相互作用が非同期性によって、各個体において、さまざまな解釈が得られるようなモデルを考えてきた。各エージェントは、匂い付きの近傍を積極的に解釈することにより、探索効率や縄張りの生成などを可能にするのをみた。さらに、環境が時間的に変動するとき、その振る舞いに非対称な構造を得る事が分かった。このような振る舞いの非対称性は、集団認知を示唆するものである。このような3つの振る舞いはそれぞれ質的に異なる現象にも関わらず、受動相と能動相の間の非対称な相互作用によって矛盾なく実現することをみた。その意味において、多義的な機能をもつ相互作用を実装ができたと言ってもいいだろう。このような非同期による相互作用の多義性をになったモデルは、自己組織化をよりおおきな文脈で適応していくときに、重要な方法論となりえるはずである。

### 参考文献

Cornforth, D., & Green, D. (2003). Do Artificial Ants March in Step? Ordered Asynchronous Processes and Modularity in Biological Systems. *Artificial life*, MIT Press, 28–32.

- Cornforth, D., Green, D. G., & Newth, D. (2005). Ordered asynchronous processes in multi-agent systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 204(1-2), 70–82.
- Couzin, I. D. (2009). Collective cognition in animal groups. *Trends in cognitive sciences*, 13(1), 36–43.
- Davey, B.A., Priestelely, H.A. (2005) *Introduction to Lattices and Order*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Erik Axelsson, Abhirami Ratnakumar, Maja-Louise Arendt, Khurram Maqbool, Matthew T. Webster, Michele Perloski, Olof Liberg, Jon M. Arnemo, Åke Hedhammar and Kerstin Lindblad-Toh. (2013). Genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet. *Nature*. 495. 360-364.
- Giuggioli, L., Potts, J. R., & Harris, S. (2011). Animal interactions and the emergence of territoriality. *PLoS computational biology*, 7(3), e1002008
- Gunji, Y.-P., Haruna, T., & Sawa, K. (2006). Principles of biological organization: Local–global negotiation based on “material cause”. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 219(2), 152–167
- Haken, H. (1983) *Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transition and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. New York: Springer-Verlag.
- Lewis, M., & Murray, J. (1993). Modelling territoriality and wolf-deer interactions. *Nature*, 366, 738–740.
- Matsuno, K. (1991) *Protobiology; Physical bases of biology*. Crc Pr I Clc.
- Niizato, T., & Gunji, Y. (2013). Interactions between species and environments from incomplete information. *Biosystems*, 111, 145–155.
- Niizato, T., (2013). Multiplicity of Interactions in an Asynchronous Updaing Method: Emergence of Collective Cognition. (Submitted)
- Sumpter, D. J. T. (2006). The principles of collective animal behaviour. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 361(1465), 5–22.