

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540059

研究課題名(和文) ポイント論理・オープン論理を用いたアリの道標創発に関する実験と理論

研究課題名(英文) Experiments and theory regarding the emergence of landmark based on point and open logic

研究代表者

郡司 幸夫 (Gunji, Yukio)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40192570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：記号の論理的使用には、記号間の関係に関する論理と、記号の意味間の関係に関する論理との両者が必要になる。この両者の関係は、任意の状況に関して整合的ではないことが知られている。両者の矛盾を解決するには、論理操作の使用に制限を加える必要があると言われたきた。これに対して、本研究では、矛盾が出現したその都度、矛盾を解消する局所的な記号が出現する仮説を提案し、これを庭アリにおける道標形成実験として実装した。その結果、庭アリは論理的矛盾に際してこれを解決する新しい記号を形成し、矛盾した状況を一個の状況として知覚するという結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Usage of logical symbol requires both the logic of symbols and the logic of meaning of the symbols. It is well known that there is a contradiction between point and open logic, and that the contradiction can be resolved by introducing a constraint on using logical operations. In our research we propose a hypothesis of which an agent confronting a logical contradiction perpetually construct a new symbol embedding a contradiction, and implement the hypothesis as an ethological experiment of garden ants. We finally show that garden ants could constructs a new landmark in confronting a contradiction of previous landmarks.

研究分野：動物行動学

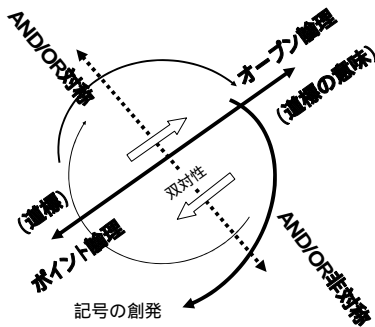
キーワード：認知地図 道標 探索戦略 社会性動物 時間

1. 研究開始当初の背景

風景を道標として用いるナビゲーションは、最も基礎的である。研究例の多い砂漠アリでは、遠方からも視認できる道標の使用が唱えられていた(Cartwright and Collett, 1983)が、アリの一般に、遠方からは見えない、橋頭堡的道標を使うと理解されつつある(Collett et al., 2006)。現在この橋頭堡的道標がロケール型か、タクソン型かについて論争が続いていた(Cheng, 2012)。

図1

ロケールかタクソンかは実は両義的であり、その両義性は道標自体の区別と、道標の意味の区別の両義性にあるのではないか。道標を集合の要素とすると、道標の意味は、その道



標から到達可能な道標の集合となる。申請者は、生物システムを、干渉し合う異なる論理的階層の並列計算処理システムと捉え、真性粘菌やミナミコメツキガニのモデル構築や、それをを用いた論理ゲートの開発を行ってきたが、同様に、道標とその意味の関係を、二つの論理の関係から成る**位相システム**(Vickers, 1987)で表現し、二つの論理間関係を力学系とすれば、新たな道標創発の予測が可能となり、実験が実施できると考えるに至った(図1)。

2. 研究の目的

未知の空間を探索する方法に、道標の使用がある。特にアリやハチにおいて、道標がその周囲全体(**コト**)を指し示すか(**ロケール型**)、次の道標(**モノ**)を一意に示すか(**タクソン型**)は現在も論争の続く問題である。しかしタクソン型ですら、道標を設定する段階では、ロケール的な空間・道標関係の同定が必要となる。この問題の困難は、道標の同定・使用に、道標自体(木か石かなど)の区別と、道標の意味(どのような場所を指示するか)の区別という二重の操作が存在し、両者を関係付けることが、通常、**論理的矛盾**を帰結する点にある。ここでは二重の操作と関係を、**ポイント、オープン論理とその間の動的関係**と定義し、両者の齟齬を通して新たな道標が創発される実験をデザイン・実施し、道標を用いたナビゲーションの根源的理論を構築する。

このようなふたつの論理の齟齬と調停は、ナビゲーション全般について、局所と大域の関係において認められる。そこで、アリや魚

類、真性粘菌に関してその歩行パターンをベキ指数に関して解析し、二つの論理の齟齬とそこから誘導される非平衡化過程を実装したモデルを構築し、ベキ指数などを比較した。

3. 研究の方法

動物の道標形成やこれを用いたナビゲーションについて、道標自体の論理的操作と、道標の意味(到達可能な道標の集合)に関する論理的操作を、各々ポイント論理、オープン論理としてモデル化し、二つの論理の動的関係をモデルによって構築した。

モデルの妥当性は、クロオオアリ(Camponotus)やミナミコメツキガニ、真性粘菌を用いた動物実験によって確かめられる。実験は、円筒を道標として用い、他の視覚効果や道標フェロモンの効果を遮断した装置によって実施される。ポイント論理に関する論理表現(AND, OR, NOT)が、オープンとの帰属関係を、満たしながら可能か、逆にオープン論理に関してはどうか、を確かめ、両者の関係の齟齬条件をモデルに与えた。

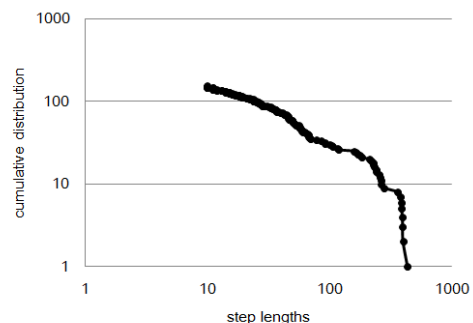
またアリやアユ、ミナミコメツキガニ、真性粘菌について、その歩行パターンを解析し、ロケール、タクソンの齟齬と調停同様に、局所的判断と、大域的判断に關与する記憶との間の齟齬と調停をモデル化し、そこから得られるステップ長の頻度分布を用いて、短距離と長距離の探索パターンがどのような関係にあるのかを評価した。

4. 研究成果

2次元パターンを目印として道標学習を行なうかについて実験すると共に、探索時のアリの移動様式に関するモデルを考察し、実際の補講実験結果との比較を行なっている。学習に関しては、時間的「または」を空間的「かつ」に置き換える傾向が見出されつつあるが、研究続行中である。移動様式に関しては、過去の履歴に応じて移動方向の確率を調整するモデルにより、レビフライトが実現されるという結果を得、現実のアリでも同様の結果がみられることを確認している(図2)。

図2

また、道標学習のモデルを構築し、局所的道標の張りあわせとして形成される探索システムを構築し、そのようなシステムが、餌を発見するまでの時間に比べ、極めて短時間

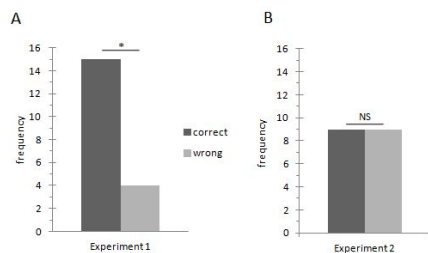


で巣へ戻ることができることを示し

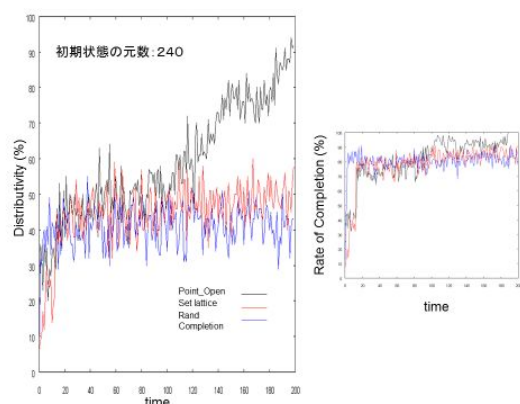
た。
さらに道標の分布を順序集合としてその上の論理をポイント論理として定義し、道標の意味をロケールとして定義し、それ上の論理をオープン論理で定義するとき、両者の齟齬を局所的に解消するとき、アリが論理を用い(図3)かつ論理的矛盾を解消するように新しい記号を創発していることが明らかになった。

図3 . A. 学習後に AND 理解に成功したアリの頻度(黒)としなかった頻度(灰色). B. 学習していないアリにおける対照実験結果 .

図4 . 時間構造を示す因果集合が、二つの論理の齟齬を解消するステップ(横軸)の進む



ことで分配律の程度(縦軸)をあげていく(黒実線). 赤と青は対照実験結果.



同じモデルが時間論においてそのまま使用できることが判明し、因果集合との関係においてポイント論理とオープン論理の齟齬の解消が、因果的時間の構造を分配束へ収束させることも判明した(図4)。トークンとタイプのより一般的概念として、モノとコトを構想し、その両者間の動的インターフェイスとして形成される意識や全体性という部分について、認知や群れ形成を題材に、モデル化やデータ解析を進めた。それによって、思弁的実在論との関連も明らかにした。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 22 件)

1. Yamachiyo M, Adamatzky A and Gunji YP (2015) *Physarum plasmodium perceives ambiguous stimulus as either attractant or*

repellent, AIP Conf. Proc. **1648**, 580013 査読あり

2. Mutoh A and Gunji YP (2015) Synchronization in asynchronous automata evaluated by local active information strage. AIP Conf. Proc. **1648**, 580013
3. Nakamura, T and Gunji YP (2015) Crossmodal audio-visual effects in motion prediction Proceedings of the twentieth international symposium on artificial life and robotics, pp. 840-843. 査読あり
4. Sakiyama, T and Gunji YP (2015) Modulation effect with global ambiguity in 2-dimensional random walk, International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 査読あり
5. Sakiyama, T, Gunji YP (2014) The relationship between randomness and power-law distributed move lengths in random walk algorithms”, *Physica A* 402, 76–83. 査読あり
6. Gunji, YP (2014) Self-organized criticality in asynchronously tuned elementary cellular automata. *Complex Systems* **23**, 55-69. 査読あり
7. Iori T, Yamachiyo, M, Shirakara T & Gunji YP (2014) Kaniza illusory contours appearing in the plasmodium pattern of *Physarum polycephalum*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. doi: 10.3389/fcimb.2014.00010. 査読あり
8. Niizato, T, Murakami H, Gunji YP (2014) Emergence of the scale invariant proportion in a flock from the metric-topological interaction. *BioSystems* 119, 62-68. 査読あり
9. Murakami, H., Tomaru, T., Nishiyama Y., Moriyama T., Niizato, T.& Gunji YP (2014) Emergent runaway into an avoidance area in a swarm of soldier crabs. *PLoS ONE* 9(5): e97870, 査読あり
10. Gunji, YP (2014) Extended self organized criticality in asynchronously tuned cellular automata. In: Chaos, Information Processing and Paradoxical Games (Vasileios ed.) World Scientific. 査読あり
11. Gunji YP, Sakiyama T, Murakami H(2014) Punctuated equilibrium based on a locally ambiguous niche. *BioSystems*, 123, 99-105. 査読あり
12. Sakiyama T, Sasaki A and Gunji YP (2014) Origin of Kanizsa triangle illusion. In: S.-Y. Rhee et al. (eds.), *Soft Computing in Machine Learning, Advances in Intelligent Systems and Computing* 273, pp. 95-103. 査読あり
13. 村上久, 郡司 ペギオ幸夫(2014)「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」、第 28 回人工知能学会大会論文集、03a-3. 査読あり

14. Murakami H, Niizato T and Gunji YP (2014) "Noise in shoaling fish appears as several power-law behaviors" *Proceeding of European conference on complex systems 2014* 査読あり
15. Sakiyama T & Gunji Y-P (2013) Garden Ant Homing Behavior Based on Local Visual Cues. *Insectes Sociaux*. 60(2), 155-162. 査読あり
16. Sakiyama T & Gunji Y-P (2013) Emergence of an optimal search strategy from a simple random walk. *J.Roy. Soc. Interface*. 10(86), 20130486. 査読あり
17. Adamatzky A, Armstrong R, Jones J, Gunji YP (2013) On creativity of slime mould. *Int.J. General Systems*.42(5), 441-457. 査読あり
18. Gunji YP, Sakiyama T, Wakisaka S, Fujii N, Nakamura T (2013) Artificial causal space-time. *Advances in Artificial Life 2013, Proceedings of the twelfth European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (edited by Lio P, Miglino O, Nicosia G, Nolfi S, Pavone M), MIT Press, pp. 810-817. 査読あり
19. Murakami, H. Gunji YP (2013) Lévy-like Distribution Shown by Intermittent Search Model with Misunderstanding Switch Pattern, *Advances in Artificial Life 2013, Proceedings of the twelfth European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (edited by Lio P, Miglino O, Nicosia G, Nolfi S, Pavone M), MIT Press, pp. 492-497.
20. Sonoda K, Kodama, K and Gunji YP (2013) Awareness as observational heterarchy. *Frontiers in psychology*. 査読あり
21. Sakiyama, T, Gunji YP (2013) The Müller-Lyer Illusion in Ant Foraging. *PLoS ONE* 8(12): e81714. 査読あり
22. Sakiyama, T, Sasaki, A and Gunji YP (2013) Origin of Kanizsa triangle illusion, *Proceedings of The 14th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2013)*, in USB Proceedings, Daejeon, Korea. 査読あり

〔学会発表〕(計13件)

1. Nakamura T, Gunji YP, "Crossmodal audio-visual effects in motion prediction", *AROB 20th*, Beppu(2015, 1, 23)
2. Tomaru T, Murakami H, Nishiyama Y, Sonoda K, Moriyama T, Gunji YP, Information flow in a swarm of soldier crabs, *AROB15*, Beppu(2015, 1, 23)
3. 中村友昭 郡司ペギオ幸夫 "顔認識における複数性と自他境界". 計測自動制御学会, 東京(2014.12.7)
4. 青山 大秀, 郡司ペギオ幸夫 "オートマトンにおける共創 = 非同期性と調整: その頑健性の解析" 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京(2014.12.7)

5. 崎山朋子, 郡司ペギオ幸夫, "クロオオアリの視覚的目印生成実験", 日本動物行動学会第33回大会, 長崎, (2014,11,8)
6. Murakami H, Niizato T, Gunji YP "Noise in shoaling fish appears as several power-law behaviors" *ECCS2014*, Lucca, Italy (2014, 9,22)
7. Aoyama T, Gunji YP, "Universal criticality derived from asynchronously tuned automata, in a term of Derrida plot" *ECCS2014*(2014, 9,21)
8. Sakiyama T, Gunji YP, "Modulation effect in 2-dimensional random walk International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM2014, Rhodes, Greece, (2014.9.21).
9. Sakiyama T, Gunji YP, "Weber-Fechner Relation and Power-Law Distributed Step Lengths can be driven from Agents Interactions", *European Conference on Complex Systems 2014 (ECCS2014)*, Lucca, Italy, Sep, (2014.9.22)
10. Tomaru T, Murakami H, Gunji YP, "How does individual crabs form a swarm? : an experimental study", *ECCS2014*, Lucca, Italy. (2014,9,22)
11. Sakiyama T, Gunji YP, "Emergence of a Levy-like searching through agents' local interaction", *International Union for the Study of Social Insects Cairns*, Australia, (2014,7,14)
12. H Murakami, YP Gunji, "Pain Experience in Swarm?" *TSC2014*, Tucson, America. (2014.4.8)
13. 村上久, 郡司ペギオ幸夫, 「ミナミコメツキガニの群れにおける暴走の創発: 実験とモデル」, 第八回内部観測研究会(計測自動制御学会共催), 神戸(2014,3,4)

〔図書〕(計1件)

1. 郡司ペギオ幸夫(2014)いきものとなまもの哲学, 青土社, 東京, 270pp.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

郡司 幸夫 (GUNJI, Yukio)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 40192570