

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 24 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280091

研究課題名(和文) 群れにおける多様性とコヒーランスの共立機構の解明と感性計算における応用

研究課題名(英文) Mechanism for the co-existence of diversity and coherence in an animal group and its application to the sense-computing

研究代表者

郡司 幸夫 (Yukio, Gunji)

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) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：動物の相互作用が感覚-運動というだけのもではなく、そこに複数のモダリティーが関与することで一対多の運動とそこからの縮退を実現されることを実験的、理論的に示した。その結果、外部刺激に対する内部予期と調整が実現され、複雑な個の多様性と、全体に寄与する個の操作性、全体としての一貫性、頑健性が実現されるという結論を得た。この事実は、甲殻類や社会性昆虫、群れをつくる魚類などに幅広く認められ、細胞の群れである一個の身体、意識を持つ身体にまで拡張可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We showed that the interactions among animal individuals could result not from a simple sensor-motor coupling but from one-to-many type mapping and its degeneration influenced by multiple modalities of senses. It is concluded that the interactions revealed intrinsic anticipation and negotiations which could carry diversity of individual behaviors contributing to the robust and united wholeness. Our findings can be generalized not only in a broad taxa of animals including swarms of crustaceans, social animals and fish schools but in the united body of human being which could give rise to consciousness.

研究分野：理論生命科学

キーワード：群れ 内部予期 多様性 マルチエージェント インテリジェンス

1. 研究開始当初の背景

一個の全体を評価可能な、最も可能性のある対象が、動物の群れである。一系乱れぬ素早い運動をするムクドリの群れやニシンの群れは、古くから、それ自体一個の生命体ではないかと思われてきた(Couzin, 2007)。BOIDS と呼ばれる単一固定近傍を有したボトムアップ型のモデル(Raynolds, 1987)は、動物の群れ一般の挙動をよく説明するものと考えられ(Vicsek et al., 1995; Czirok and Vicsek, 2006)、一個の全体性という議論は忘れ去れつつあった。ところが近年、画像解析の進歩により、数千単位の個体から成るムクドリの群れが解析され、BOIDS に異義が唱えられつつある(Ballerini, et al., 2008)。特に、群れに内在するゆらぎベクトルの解析から、同期して動く群れの大きさに対して一定比率を有するサブドメインの存在が発見された(スケールフリー相関と呼ばれる)(Cavagna et al., 2010)。これを BOIDS やその派生モデルで説明するには、近傍半径が群れサイズになるような不自然な仮定が必要となる。

元来、BOIDS やその派生モデルは、カオス的集団に定向性を与える力学によって群れ = 定向配列を形成するモデルである。内在するゆらぎは群れ形成を妨げ、対立するものであっても、決して寄与するものではない。本研究では、ゆらぎが群れ形成に積極的に寄与するモデルを与え、その計算論的意義を人間の感性計算に求めるが、そのような目論見は Pfeifer & Bongard(2007)に多少認められるものの、具体化されていないのが現状であった。

2. 研究の目的

我々は数百～数万個体からなり、唯一 2 次元に展開して解析が容易い群れ、沖縄県西表島のミナミコメツキガニ (*Mictyris guinotae*) の群れをモデル生物として選び、群れ行動解析とそのモデル構築を進めてきた。まず個体間の相互作用がどのようなものであるかについて、室内実験を繰り返し、個体間に或る種の誤解があり、誤解によるディスコミュニケーションの果てに、極めてミキシングを伴う運動が実現されることが示唆された。その上で、干潟上での大規模なビデオ撮影、観察を行い、群れに関する行動の特徴を抽出するに至った。その結果、第一に、群れとしての形態を取りながら内部に激しいゆらぎを有する点、第二に、集団密度が上がることで通常渡ることのできない河を渡る点、第三に、群れの

他の部分では先行個体に追従する、などの特徴が見出され(第一の点は群れ形成力とゆらぎが対立項である BOIDS に矛盾する)、個体の相互予期が群れ形成に積極的に関与する可能性が見出された。

以上を考慮することで、内部ゆらぎの共鳴によって相互予期を実装した近傍と、他個体をモニターし追従する近傍を実装し、内部に激しい乱流を作りながらそのゆらぎが、群れ形成に積極的に寄与するモデルを構築し、集団での渡河行動などを説明する。また、群れをボールと考え衝突計算の論理ゲートを構築し、外的ゆらぎに対しても頑健で、パフォーマンスの落ちない計算を実現する。

3. 研究の方法

群れの有する身体性を解明するため、(1)西表島ミナミコメツキガニの群れ行動を高解像度で撮影し、その運動データから、相互予期に基礎付けられた直接的証拠を得、コヒーレンスの一つの表現であるスケールフリー相関が相互予期から得られることを示すと共に、モデルを構成し検証する。(2)スケールフリー構造の動的変遷と、相互予期ネットワークの動的変遷の関係を解析することで、群れの機能的分化と一個の全体性を担保する構造との関係を明らかにし、これらを認知科学におけるモノ的知覚、コト的知覚と対比する。(3)モノ的知覚、コト的知覚の形成を、ゆらぎを内在した計算担体によって実現し、これによって、様々な感性計算が、モノ的計算とコト的計算のバランスによって、モノ・コトスペクトラムとして理解可能となることを示す。特に、Aha 図形知覚、身体感覚(身体スキームと身体イメージ)に注目して明らかにする。

4. 研究成果

庭アリやミナミコメツキガニ、アユや真性粘菌について、異なる知覚モダリティの重なりなどに起因した、外部刺激と知覚の間の一対多関係を明らかとし、そこに内部予期が潜むことを示唆した。その結果群れ自体が一個の全体性を担うこと、群れが個体間相互認知の場となっていることを明らかにした。この延長上に、内部予期がベイズ推論と逆ベイズ推論の重ねあわせで実装できるモデルを提案し、内部予期の一般化を進めた。

我々の群れのモデルは、二種類の近傍で定義された。近傍とは元来、群れ構成個体にとって他個体をモニターする微小空間であり、個体が他個体と広義の接触をする共創の場に他ならない。すなわち近傍とは、空間であると同時に、自らモニター可能な場として構成された身体である。この事情は、脳科学が明らかにしつつある身体の所有性と操作性の両義性に同様な構造と考えられる。視覚と触覚の同期により、「わたしの」身体がゴムの手に転

移される現象が知られているが、これは身体イメージの転移を示している。対して、熟達した理髪師の缺は、手の延長のように機能するが、理髪師は缺の傷に痛みを感じることはない。理髪師の缺は身体スキームの問題である。

共鳴は、各個体の運動相互予期表現と考えられる。現実の個体は、視覚とそれ以外のあらゆる感覚系を総動員して互いの運動方向を察知し、運動方向を決定している。

現在我々は、可能性の束を、ミナミコメツキガニ個体の運動履歴から構成し、その集中によって実際の運動が実現されるか評価しているが、その結果、可能遷移の共鳴によって運動が実現されるというデータが得られた。これにより、相互予期に運動が基礎付けられている可能性が示唆された。

真性粘菌の探索行動についても、局所的判断が時空の大域と関与しながら運動を進めるか否か判断する実験を行った。もしそうであるなら、人間の視覚における錯覚と似た挙動がパターン形成に認められると予測したが、実際、カニツツア錯覚と同様のパターンが実現し、内部予期を持つモデルで説明できた。

また、亜熱帯の干潟に生息するミナミコメツキガニの砂上活動量および他個体への接触頻度は、隣接他個体の視覚的配置の影響を受けることを実験で示した。また、他個体への接近と忌避の選択は、個体によって大きく異なることを明らかにした。

臨界状態へと自己組織化する適応的ブーリアンネットワークモデルを提案し、その振舞いについて理論研究を行った。特に、ネットワーク上のダイナミクスに対して平均場近似を仮定し、ネットワークの入力次数分布の時間発展が従うマスター方程式を導出してその定常解を求めることで、定常入力次数分布とネットワーク上のダイナミクスの関係を明らかにした。また、様々なブーリアンダイナミクスに対して数値シミュレーションを行い、その結果と解析解がよく一致することを示した。

真性粘菌変形体に対し誘引忌避混合刺激(好悪の両方を含む刺激に相当)を与える実験により、変形体の混合刺激に対する応答が誘引傾向か忌避傾向かのどちらかに二者択一的に分岐することを見出した。また、この現象に関する遺伝子制御ネットワークモデルを作成し、現象の再現が可能であることを示した。

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 56 件)

- (1) Gunji, YP., Sonoda, K., Basios, V., 2016, Quantum cognition based on an ambiguous representation derived from a rough set approximation. *Biosystems*, 141, 55-66 (査読有)
- (2) Minoura, M., Sonoda, K., Sakiyama, T., and Gunji YP., 2016, Rotating panoramic view: interaction between visual and olfactory cues in ants. *Royal society open science*, 3, 150426, DOI: 10.1098/rsos.150426. (査読有)
- (3) Tomaru, T., Murakami, H., Niizato, T., Nishiyama, Y., Sonoda, K., Moriyama, T., and Yukio-Gunji, YP., 2016, Information transfer in a swarm of soldier crabs, *Artif Life Robotics*, DOI 10.1007/s10015-016-0272-y(査読有).
- (4) Sakiyama, T., Gunji, YP., 2016, Lévy-like movements in Japanese carpenter ants: Experimental and theoretical approaches, *Ecological Complexity* 26, 21-28(査読有).
- (5) Sakiyama, T., Gunji, YP., 2016, The Kanizsa Triangle Illusion in Foraging Ants, *BioSystems* 142, 9-14(査読有).
- (6) Sakiyama, T., Gunji, YP., 2015, Weber-Fechner relation and Lévy-like Searching Stemmed from Ambiguous Experiences, *Physica A*, 438, 161-168.
- (7) Sakiyama, T., Gunji, YP., 2015(査読有), Modulation effect with global ambiguity in 2-dimensional random walk, *Int J.Par. Emer. Dist. Sys.* published online, DOI:10.1080/17445760.2015.1016518 (査読有).
- (8) Murakami, H., Niizato, T., Tomaru, T., Nishiyama, Y., Gunji, YP., 2015, Inherent noise appears as a Lévy walk in fish schools, *Scientific Reports*, vol. 5, pp. 10605(査読有).
- (9) Murakami, H., Niizato, T., Tomaru, T., Nishiyama, Y., Moriyama, T., Gunji, YP., 2015, Collective behavior of soldier crab swarm in both ring- and round-shaped arenas, *Artificial Life and Robotics*, 20, 315-319(査読有).
- (10) Mutoh A and Gunji YP (2015) Synchronization in asynchronous automata evaluated by local active information strage. *AIP Conf. Proc.* 1648, 580013 ;<http://dx.doi.org/10.1063/1.4912822>(査読有)
- (11) 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(査読有).
- (12) Murakami H, Tomaru T, Niizato T, Nishiyama Y, Moriyama T and Gunji YP (2015) "Collective behavior of soldier crab swarm in both ring- and round-shaped arenas" *Proceeding of The Twentieth International Symposium on Artificial Life and Robotics*. pp. 831-835(査読有).
- (13) Nishiyama, Y., Tatsumi, S., Nomura, S., Gunji, YP. (2015) My hand is not my own! Experimental elicitation of body disownership. *Psychology & Neuroscience*, Vol 8(4), Dec 2015, 425-434. <http://dx.doi.org/10.1037/pne000031>(査読有)
- (14) Sakiyama, T and Gunji YP (2015) Modulation effect with global ambiguity in 2-dimensional random walk, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, DOI:10.1080/17445760.2015.1016518(査読有)
- (15) Niizato, T. and Gunji YP (2015) Ongoing Processes in a Fitness Network Model under Restricted Resources, *PLoS One*, 10(5), e0127284, doi: 10.1371/journal.pone.0127284(査読有).
- (16) Murakami H, Niizato T, Tomaru T, Nishiyama Y, Gunji YP (2015) Inherent noise appears as a Lavy walk in fish schools. *Scientific Report* 5,10605, doi:10.1038/srep10605(査読有)
- (17) Sakiyama, T, Gunji YP (2014) The relationship between randomness and power-law distributed move lengths in random walk algorithms", *Physica A* 402, 76-83(査読有).
- (18) Gunji, YP (2014) Self-organized criticality in asynchronously tuned elementary cellular automata. *Complex Systems* 23, 55-69(査読有).
- (19) Sawa, K. and Gunji YP (2014) An emergence of formal logic induced by an internal agent. *BioSystems* 124, 39-45. doi:10.1016/j.biosystems.2014.08.005 (査読有)
- (20) Iori T, Yamachiyo, M, Shirakara T & Gunji YP (2014) Kaniza illusory contours appearing in the plasmodium pattern of *Physarum polycepharum*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. doi: 10.3389/fcimb.2014.00010 (査読有).
- (21) 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 (査読有).
- (22) 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, doi:10.1371/journal.pone.0097870 (査読有).
- (23) Gunji, YP (2014) Extended self-organized criticality in asynchronously tuned cellular automata. In: Chaos, Information Processing and Paradoxical Games (Vasileios ed.) World Scientific (査読有).
- (24) Gunji YP, Sakiyama T, Murakami H (2014) Punctuated equilibrium based on a locally ambiguous niche. *BioSystems*, 123, 99-105, doi:10.1016/j.biosystems.2014.05.005(査読有)
- (25) 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(査読有).
- (26) 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, DOI: 10.1007/978-3-319-05533_6_10(査読有).
- (27) 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(査読有)
- (28) 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* (査読有)
- (29) Yamachiyo M, Adamatzky A and Gunji YP (2015) *Physarum* plasmodium perceives ambiguous stimulus as either attractant or repellent, AIP Conf. Proc. 1648, 580013 (2015); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4912821> (査読有).
- (30) Sakiyama T & Gunji Y-P (2013) Garden Ant Homing Behavior Based on Local

- Visual Cues. *Insectes Sociaux*. 60(2), 155-162 (査読有).
- (31) Sakiyama T and Gunji Y-P (2013) Emergence of an optimal search strategy from a simple random walk. *J.Roy. Soc. Interface*. 10(86), 20130486 (査読有).
- (32) Adamatzky A, Armstrong R, Jones J, Gunji YP (2013) On creativity of slime mould. *Int.J. General Systems*.42(5), 441-457 (査読有).
- (33) 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 (査読有).
- (34) 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 (査読有).
- (35) Sonoda K, Kodama, K and Gunji, YP (2013) Awareness as observational heterochy. *Frontiers in psychology*. Doi: 10.3389/fpsyg.2013.00686 (査読有).
- (36) Sakiyama, T, Gunji YP (2013) The Müller-Lyer Illusion in Ant Foraging. *PLoS ONE* 8(12): e81714. doi:10.1371/journal.pone.0081714, December 11 (査読有).
- (37) 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 (査読有).
- (38) Niizato, T, Gunji YP (2013) Interactions between species and environments from incomplete information. *BioSystems* 111(3), 145-155 (査読有).
- (39) Nishiyama, Y, Gunji YP, Adamatzky A (2013) Probabilistic real swarm logical gate. *Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012, Springer Proceedings on Complexity* (T. Gilbert et al. eds.) pp. 271-278. DOI 10. 1007 /978 -3 -319 -00395-5_36 (査読有)
- (40) Minoura M, Sonoda K, Sakiyama T, Gunji YP (2013) Garden ants *Lasius niger* perceives rotating landmarks. *Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012, Springer Proceedings on Complexity* (T. Gilbert et al. eds.) pp. 615-620. DOI 10. 1007 /978 -3 -319 -00395-5_75 (査読有)
- (学会発表) (計 32 件)
- (1) Tomoko Sakiyama, Yukio-Pegio Gunji, “Deviated Trail-Laying Behavior Stemmed from Directional Interaction”, *Behaviour 2015*, Cairns, Australia, 9-14, Aug, 2015, poster
- (2) Hisashi Murakami, Takenori Tomaru, Takayuki Niizato, Yuta Nishiyama, Kohei Sonoda, Toru Moriyama, Yukio-Pegio Gunji, “Collective behavior of soldier crab swarm in both ring- and round-shaped arenas”, *The Twentieth International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con PLAZA, Beppu, January 21-23*
- (3) 村上 久, 新里 高行, 都丸 武宜, 西山 雄大, 郡司 ペギオ幸夫, “内的ゆらぎの群れ内情報伝達への貢献”, *SI2015*, 名古屋国際会議場, 12月14-16日
- (4) 村上 久, 新里 高行, 都丸 武宜, 西山 雄大, 郡司 ペギオ幸夫, “群れ内部における個体の臨臨界的振る舞い. 日本動物行動学会 第 34 回大会 2015 年 11 月 20-22 日東京海洋大学
- (5) 郡司ペギオ幸夫 2015年4月26日 複雑系研究会主催(早稲田大学西早稲田キャンパス基幹理工学部)および講演 講演題目: 観測過程を内在した意識モデルに向けて 於: 早稲田大学西早稲田キャンパス基幹理工学部、東京
- (6) 郡司ペギオ幸夫 2015年6月13日 比較思想学会第 42 回年会招待講演 講演題目: 生命 = モノとコトの齟齬を反故にする表現体, 於: 東洋大学、東京
- (7) 郡司ペギオ幸夫, 2015年10月27日 - 28日, 講演題目: 群れにおける内部予期 CBI 学会・分子ロボティクス分科会・招待講演, 於: タワーホール船堀、東京
- (図書) (計 3 件)

- (1) 郡司 ヲギオ - 幸夫(2014)いきものとなまもの哲学. 青土社、東京. 269pp.
- (2) 郡司 ヲギオ - 幸夫(2013)群れは意識を持つ. PHPサイエンスワールド新書、東京. 294pp.

[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

Yukio Gunji (Yukio Pegio Gunji)

(早稲田大学・理工学術院・教授)

研究者番号: 40192570

(2)研究分担者

白川 智弘

Tomohiro Shirakawa

(防衛大学校・電気情報学群・助教)

研究者番号: 60582905

春名 太一

Taichi Haruna

(神戸大学・理学研究科・助教)

研究者番号: 20518659

森山 徹

Toru Moriyama

(信州大学・繊維学部・助教)

研究者番号: 20325898