

自己駆動粒子の集団運動様相: 局所計算により全体様相の制御へ向けて Do self-driven particles dream of group consciousness?

A chemistry, synchronization and topological space determine dynamic coordination between local and global dynamics

齋藤 萌香^{*1}
Moeka Saito

我妻 広明^{*1,2}
Hiroaki Wagatsuma

^{*1} 九州工業大学大学院生命体工学研究科
Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

^{*2} 理化学研究所脳科学総合研究センター
RIKEN BSI

Collective dynamics generated from massive self-driven particles is of particular interest to academics studying on biological system, social mechanics and fluid dynamics, which leads to the whole structure through parallel, local and neighboring based calculations in a given topological space and provides an expectation about its performance on the realization of signal transduction in the molecular level and various applications of communication devices for information transfer. In this study, we focused on its mathematical aspect and explored the essence of what factor extends the Vicsek model [Vicsek 1995] toward dynamic coordination or flexible coupling between local and global dynamics. In our computer experiments, we reproduced the original results and analyzed temporal change before stable dynamics, which may offer a important clue to elucidate what nematic ordering parameter means and its interaction functions to crystallize.

1. はじめに

粒子間相互作用モデルは、生体間の複雑な協力関係のダイナミクスを現象論的に説明するために用いられ、動物が群れを自発的に構成する力学[Reynolds 1987], 生体分子の集団的特性[Pirollet 1987][Vicsek 1995], 生体内繊維や結晶の自己組織的化を再現することが知られている[Sumino 2012][永井 2012][永井 2013]. 我々はこのような力学を脳内計算過程解明あるいはロボット用人工知能の自律性導入に用いることを試みてきた[Wagatsuma 2009][我妻 2012][齋藤 2013]. 流体や弾性体という連続体力学シミュレーションにおいては、質量の保存を表す連続の式や運動量の保存を表す方程式などの偏微分方程式で系が記述される. この支配方程式は、従来、計算格子で離散化する方法が主であった. しかし、計算格子を細密にすれば精度が得られるという単純な問題に還元しない. 格子を空間固定して(外部観測者の)オイラー法では対流項で精度が劣化し数値振動や拡散が発生し、流れに沿って格子を決める(内部観測者の)ラグランジュ法では流体の分裂や合体で格子のゆがみが顕著となり計算不能になることがあるからである. 粒子法[越塚 2005]では、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルにより、格子を用いずにラグランジュ法で離散化することで、従来の差分法や有限要素法で懸案であった複雑形状下の格子設計の問題を画期的に軽減する展望がある. 格子の単純な細分化は、組み合わせ爆発によって膨大な計算量を必要とする. 格子設計に基づく手法では、高い計算精度でより短時間に解を得るために、多くの場合、熟練した技術者が人手で、格子の微妙な調節や不整合性のチェックを行ってきた. 局所近傍計算は、流れの状態や形状に合わせて自動的に粒子(計算点)、つまり密に計算が必要な箇所の接続関係を与え、密と粗を混在して、全体様相を精密かつ短時間で数値計算できる可能性がある.

連絡先: 齋藤萌香, 九州工業大学大学院生命体工学研究科(我妻 研), 〒808-0196 北九州市若松区ひびきの2-4, 093-695-6159, saito-moeka@edu.brain.kyutech.ac.jp

微生物運動において自己組織化を形成するシミュレーションにおいても、精密に再現すべく、実験条件が模索されてきたが、化学物質による多種の作用よりも、力学運動としての衝突による相互作用に注目した数理モデルで、群れ運動の相転移が再現できることが示され[Vicsek 1995], 先の計算格子の問題同様、局所近傍計算による全体様相の把握が現実味を帯びてきた.

本研究では、局所近傍計算で自走特性を「記憶」として計算し、ネマチック相互作用と呼ぶ振動子引込みの計算論に単純化できる粒子運動モデルの数理に注目し、その渦構造生成のダイナミクス解析を通して、計算論の拡張性を模索する.

2. 方法

本研究では粒子走性の方向相互作用「ネマチック相互作用」[運動の曲率の長時間相関維持]に注目した自己駆動粒子モデルを用いる[Sumino 2012]. Sumino らは、粒子は定速度で運動するとし、運動方向 θ に対して揺らぎおよび相互作用を考慮した. 以下にその定式化を示す.

$$\dot{\mathbf{x}}_i = v_0(e_x \cos \theta_i + e_y \sin \theta_i) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{\alpha}{n_i(t)} \sum_{|n_i - n_j| < l} \sin 2(\theta_j - \theta_i) \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_i = -\frac{1}{\tau}(\omega_i - \omega_0) + \xi(t) \quad (3)$$

ここで \mathbf{x}_i は各粒子の位置を表す. 粒子は速さ v_0 で θ_i 方向に運動し、半径 l (微小管の長さ) 内にいる粒子とネマチック相互作用をする. 相互作用の強さは $a/n_i(t)$ であり、 $n_i(t)$ は粒子 i 周りの半径 l 内にいる粒子の数を表す. $\theta_i(t)$ はさらに相関時間 τ , 平均 ω_0 の有色ノイズ ω_i の擾乱を受けるが、ここでは単純化のために $\xi(t) \equiv 0$ とする. モデルの計算機実験では、パラメータを $l=1$, $\tau=1000$, $\alpha=0.1$, $\omega_0=0.5$ に固定し、渦構造の速度依存性を検証するため、粒子速度 v_0 を変化させた.

ここで、粒子速度が速い条件 $v_0 = 0.5$ を条件 F、粒子速度が遅い条件 $v_0 = 0.25$ を条件 S とする。以下、この二条件で計算機実験を行い、様相変化を観測した。尚、実験領域は 10×10 として、左右上下が接合した二次元トーラスの形をとるとする。

3. 結果

初期固有振動数 $\omega_i(0)$ は $[-1, 1]$ の一様乱数で与えられる。したがって、式(3)により、すべての ω_i は ω_0 へ時定数 τ で収束する(図 1)。これら固有振動数の変化に伴い、変化する粒子の集団様相を図 2 に示す。システム内の固有振動数のばらつきが減ると粒子は、ランダムな状態(Step=1000)から時計回り、反時計回りの渦が i) 出来始め(S: Step=1300; F: Step=1000)、より安定した凝集状態へ相転移する。渦の発生後、渦同士で ii) 相互干渉を行い(S: Step=2500; F: Step=1700)、渦の大きさが iii) 成長する(Step=5000)。但し、条件 S では中心から外縁へ向かって渦を巻く様子が認められ、条件 F は確認ができない。興味深いことは、条件 S では一旦形成された渦の外縁が棒状集団で乖離し(皮が剥かれるように)、別の渦に近づき、また離れるという「渡り」の状態が観測される。条件 F では、「剥がれ」はまれに観測されるが、「渡り」は確認できない。これは低速であることを起因とし、高速の場合は渦の牽引力が強いため、形成された大集団から小集団が離れることが抑制されているようである。安定状態での渦の大きさは条件 F が勝る。

4. 考察

本研究では、自己駆動粒子の計算論検証の一步として、渦生成過程の再現と生成に必要な条件の探索、更に微小管としては「粒子は定速度」と仮定された速度に注目し、速度依存的な渦形成の差異を可視化し、その全体様相の変化を分析した。このような計算論が、脳内情報処理過程のモデル化に繋がるとすれば、発火の時間的相関性で形成されるシナプスの多様性を大規模シミュレーションで得るのではなく、計算点としての効果的な情報処理並列・細分化が可能となる。 N 個の神経細胞の $N \times N$ 相互作用に、時間的経緯で異なる形状、伝達効率のシナプス特性 $M(t)$ を考慮すれば、 $N \times N \times M(t)$ の膨大な計算量となり、これが近傍計算で並列化できることの意味は大きい。

参考文献

[Reynolds 1987] CW Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, Computer Graphics, 21, 25-34, 1987.
 [Pirollet 1987] F Pirollet, D Job, R L Margolis, and J R Garel: An Oscillatory Mode for Microtubule Assembly, EMBO Journal, 6(11), 3247-3252, 1987.
 [Vicsek 1995] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen II, Shochet O: Novel type of phase transition in a system of self-driven particles, Phys Rev Lett., 75(6):1226-1229, 1995.
 [Wagatsuma 2009] H Wagatsuma: Cultivated Microorganisms Control a Real Robot: A Model of Dynamical Coupling between Internal Growth and Robot Movement, Lecture Notes in Computer Science, 5506, 1082-1089, 2009.
 [Sumino 2012] Y Sumino, KH Nagai, Y Shitaka, D Tanaka, K Yoshikawa, H Chaté, K Oiwa: Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules, Nature, 483(7390), 448-452, 2012.

[永井 2012] 永井健: 記憶を持つ自走粒子集団の格子形成に関する数理モデル, 数理解析研究所講究録, 1808, 73-77, 2012.
 [我妻 2012] 我妻広明, 齋藤萌香: 感情的知性の現象論的モデル -感情は紛争を回避する, 日本神経回路学会第 22 回全国大会 (JNNS2012), P3-23, 2012.
 [永井 2013] 永井健, 住野豊, 大岩和弘: ダイニンに駆動された微小管の集団運動, 生物物理, 53(3), 149-152, 2013.
 [齋藤 2013] 齋藤萌香, 我妻広明: 粒子モデルにおける壁面形状複雑度依存した運動軌道稠密性と壁面衝突周期不規則性の関係, JWEIN'13, ネットワークが創発する知能研究会, 37-40, 2013.
 [越塚 2005] 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005.

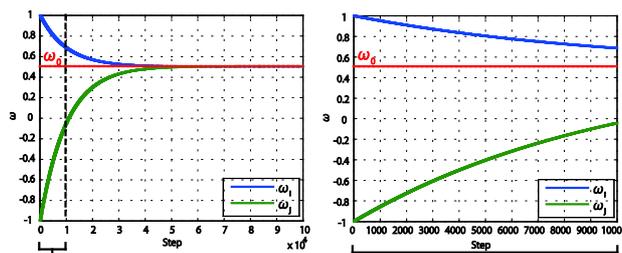


図 1. ω の変動の様子

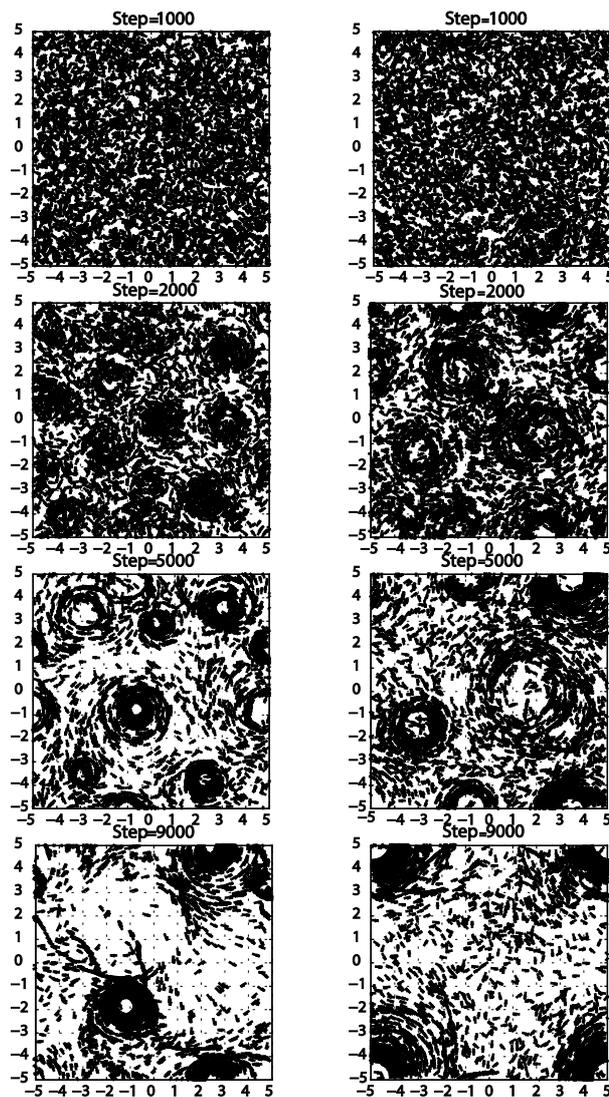


図 2. 集団様相の変化の様子。左列: 条件 S, 右列: 条件 F