HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Identification of Leader and Follower Agents and its Interaction Domain from Trajectories in a Collectively Moving Colony [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Basak, Udoy Sankar
Description	担当：理学部図書室
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(生命科学)
Dissertation Number	甲第14389号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81980
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Udoy_Sankar_Basak_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（生命科学）　氏　名　BASAK, Udoy Sankar

審査担当者	主査	教 授	小 松 崎　民 樹（電 子 科 学 研 究 所）
	副査	教 授	芳 賀　永
	副査	教 授	グ ン　剣 萍

学 位 論 文 題 名

Study on Identification of Leader and Follower Agents and its Interaction Domain from Trajectories in a Collectively Moving Colony
（協同的コロニーの軌道データによる先導・従エージェントとそれらの相互作用領域の同定に関する研究）

博士学位論文審査等の結果について（報告）

細胞の集団運動は、例えば、癌の成長、創傷治癒、器官発生といった多くの生物学的過程において重要である。単細胞生物のコロニー、例えばアメーバ Dictyostelium discoideum は cAMP を放出することにより情報のやりとりを行い、リーダーとなる細胞、およびその細胞に従うフォロワー細胞に役割分化し、最終的に反応拡散系で有名なベロウソフ・ジャボチンスキー反応のような、細胞群を通るらせん波のパターンを生み出すことが知られている。このような要素（ここではエージェントと呼ぶ）間の相互作用を通じて全体の振る舞いが自律的に変化するダイナミクスは、細胞以外にも、鳥、魚のような群れの挙動にも見いだすことができる。このような系に対する理論研究としては Reynolds フロッキングモデル、 Couzin モデル、Vicsek モデルなどの数理モデルも提案されている。例えば、Vicsek モデルは集団運動する自己駆動粒子ダイナミクスにおけるリーダー/フォロワー粒子の識別、対称性の破れ、相転移などの研究に広く使われている。しかしながら、集団運動しているエージェントの運動軌跡の集合（細胞のトラッキング実験に相当）だけに立脚し、背後の相互作用領域を定量評価し、リーダーとフォロワーの役割分化を定量的に識別する手法は開拓されていない。さらには、細胞性粘菌の動態イメージデータに基づいて実際に相互作用距離を同定し、リーダー・フォロワー細胞をデータ駆動的に分類した例はまだ皆無である。

本論文は、このような現況において、細胞性粘菌における飢餓状態における離合集散の速度ベクトル場データ（Particle Image Velocimetry 粒子画像流速計)、細胞トラッキングデータから背後にある細胞の役割分化をデータ駆動的に同定するためのデータ駆動型手法を開発することを目的としている。本論文では、エージェント間の相互作用領域およびリーダー・フォロワー粒子の役割を運動軌跡のみから推定する情報理論的手法を開発した。実際のデータでは、リーダー・フォロワーが客観的に定義されていないため、本論文では、リーダー・フォロワー粒子を事前に定義した Vicsek モデルを用いて、リーダー・フォロワーが未知であると仮定し、運動の軌跡から同定された最適な相互作用領域を用いることで、リーダーとフォロワーの

識別が大幅に改善されることを明らかにした。

本論文は8章構成になっている。

第1，2章では、上記の問題設定と本論文の理論背景である情報理論のうち、情報エントロピー、結合エントロピー、条件付きエントロピー、平均相互情報量、時間遅れの平均相互情報量、移動エントロピーについて詳解している。

第3章では、細胞性粘菌の離合集散ダイナミクスとcAMPパターン、およびリーダー・フォロワー細胞と期待される細胞トラッキングデータについて移動エントロピーの立場から考察を与えている。実際にリーダー・フォロワー細胞の客観的な定義が存在しないため、手法を開拓するうえで、数理モデルを用いてリーダー・フォロワー細胞を事前に定義し、運動の軌跡からその役割をどれくらい推定できるかを問う必要がある。

第4、5、6章では、そこで、Vicsek モデルを改良しリーダー・フォロワーを細胞間相互作用の大きさで定義し、多エージェント系において、背後にあるエージェント間の相互作用領域を、運動軌跡のアンサンブルから推定する情報理論的枠組みを提案している。集団挙動の研究においては、捕食者-被食者相互作用とリーダーとフォロワー識別を研究するために、シミュレーションデータと実験データの双方に対し、移動エントロピーが用いられているが、実際、動物、細胞、または鳥などのエージェント間の相互作用領域をデータ駆動的に推定する方法はなかった。著者は、エージェント間の情報伝達を評価するうえでカットオフ距離 λ を新規に導入し、Vicsek モデルを例に、カットオフ距離以内の軌跡に対する平均移動エントロピーから背後の相互作用半径を高精度で評価できることを示すことに成功した。また、同定された相互作用領域を用いることで、相互作用距離を考慮にいれない従来法に比べて、リーダーとフォロワーの識別が大幅に改善されることを明らかにした（*Phys. Rev. E* に発表）。

第7章では、運動の軌跡の有限長および熱揺らぎの効果を議論し、比較的短い長さのデータであっても、背後の相互作用領域を推定する手法も新規に提案した(*J. Chem. Phys.*に発表)。

第8章では、今後の展望で締めくくっており、例えば、開発した手法が分子間相互作用の評価などにも用いることができることなどに言及している。

以上は本論文の要旨である。これを要するに、著者は、データ駆動的に運動の軌跡から系固有の相互作用領域を同定し、従来法よりも高精度にリーダー・フォロワー細胞などが識別できる解析手法を新規に開発したものである。未発表の結果として、細胞性粘菌の離合集散速度ベクトル場データに適用し、相互作用領域が飢餓状態依存的に変化すること、全体の挙動をトリガーするシンギュラリティ細胞が存在するであろう局所領域が同定可能であること、情報理論における移動エントロピーを更に異なる成分に分解する理論手法の開発（投稿予定）なども行っており、自律分散系において、集団の振る舞いを系統的に理解するうえで貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（生命科学）の学位を授与される資格あるものと認める。