

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330308

研究課題名(和文)大規模群れの相転移の解明と群ロボット制御への応用

研究課題名(英文) Investigation of the phase transition phenomenon in a large swarm and application to swarm robotics

研究代表者

成瀬 継太郎 (Keitaro, Naruse)

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：10301938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は数百万個体からなる群れの性質を解明し、それを群ロボットの移動制御に応用することである。その主な成果は以下の三項目である。(1)群れの挙動の相転移の現象に関しては、群れの接続関係の変化に起因することを群れモデルの数値実験により明らかにした。(2)ロボットへの応用のためには各個体の相対的な位置と速度を知る必要があるが、群れの個体間の通信を利用した、生物のような完全に局所的な分散カルマンフィルタを開発した。(3)群れの相転移現象から得た知見を群れの制御に応用し、巨大群れロボットを維持する能力を向上した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project is to model motion of a massively large swarm including millions of individuals, and apply it to control swarm robots. The following three items have been achieved as the result of this project. (1) It is investigated that the phase transition phenomenon in a swarm is caused by the change of neighborhood in a swarm, which is shown by a flocking model and numerical experiments. (2) For flocking, each of the robots should estimate a relative position and velocity of other robots in a totally local manner. The distributed Kalman filter has been developed to estimate them using local communication between the robots. (3) The knowledge obtained from the phase transition phenomenon has been applied to a flocking control model and it has become possible to make a large swarm of robots.

研究分野：ロボット工学

キーワード：スワームロボティクス 群れ形成

1. 研究開始当初の背景

ムクドリはときに数万羽の群れを作ることが知られている。群れの個体数が少ない時は、群れの形状はほぼ円盤状で運動も直線移動など単純である。しかし群れの個体数が多い時の群れの運動は一部が大きく捻じれ、また別の部分が瞬間的にちぎれ直後に群れに戻るなど複雑である。本研究ではこの群れ運動の複雑さの変化を相転移と呼ぶ。

一方、ロボット/エージェントで数万個体からなる群れを形成したままで運動させることは困難である。単純な局所的な相互作用では群れを形成させても、すぐに小さな群れに分裂してしまう。

2. 研究の目的

では、なぜムクドリは大規模な群れを維持したまま運動できるのか？群れの個体数が多い時と少ない時では、どこに、どのような違いがあるのか？本研究の目的はそれらを解明し、群れ移動ロボットの制御に応用することである。

3. 研究の方法

(I) 動的近傍ネットワークと群れの運動の相互作用

前提として、群れの個体数が変化しても個体間の相互作用は同じであるとする。すると群れの運動の変化はなぜ起こるのか？本研究ではそれを時間とともに変化する、群れの個体の相互観測によって形成される近傍ネットワークに起因すると考える。すなわちネットワークの接続関係が群れの運動に変化を与え、それがまた接続関係を変化させると考える。

(II) 各個体の動作モデルと群れの運動の複雑性の相互作用

自然界においても、すべての鳥の群れが複雑な運動をするわけではない。例えばマガンの渡り行為ではV字型の編隊を組み直線状の運動をする。それではムクドリとマガンの群れの違いはなぜ生じるのか？ここではそれを種や個体による観測機構、移動機構、目的の有無に起因すると考える。

このアイデアを以下の三群の研究課題により検証する。

(I) 動的近傍ネットワークと群れ複雑性の相互作用の解明

(Ia) 群れ運動の複雑性の数理的表現

本研究では群れ運動の複雑性を、群れの各個体の位置/速度分布の偏りと、その時間変化の自由度の大きさで表現できると仮定する。そして個体数や下の(II)の各要素が変化したときの自由度の変化を調査し、群れ運動の複雑性の指標として妥当かを考察する。

(Ib) 動的近傍ネットワークの時間発展と群れ複雑性の変化との相互作用の解明

群れ運動の位置/速度の分布の自由度が大きくなると、形成される近傍ネットワーク

の接続関係も時間とともに大きく変化し、それが運動の自由度を一段と大きくする。その相互作用の時間発展を数理的に解明する。

(II) 個体モデルが群れ複雑性に与える影響の解明

(IIa) 観測機構と近傍ネットワークの関係の解析

ムクドリの近傍は方向に関して偏りがあることが知られている[1]。マガンもまた異なった観測領域を持っているであろう。ここでは個体の観測機構に異方性を仮定し、それがもたらす近傍ネットワークの接続関係の違いが群れ運動へ与える影響を解析する。

(IIb) 移動機構と近傍ネットワークの関係の解析

ムクドリとマガンの群れの複雑性の違いは、それらの飛翔能力の違いも一因であろう。一方で地上を移動する哺乳類の群れはまた違った形状になる。このような移動機構の違いが群れ運動に与える影響を解析する。

(IIc) 各個体の目的の有無/分布と群れ運動複雑性の関係の解析

群れの運動ではすべての個体が目的地を知っているわけではなく、多くの個体は周りとの相互作用で運動を決定している。ミツバチの例では群れの10%の個体が目的地を知っているときに最も効率的に群れの移動が実現できることが示されている[2]。本研究では群れの中で目的を持っている個体数とそのパラッキが群れ運動の複雑性に与える影響を解析する。

(III) 大規模エージェントの数値実験による理論の検証と超多数移動ロボット制御手法の構築

数百万個体による包括的な数値実験を行い、群れ運動の複雑性について検証を行う。また観測と移動に含まれるノイズが群れ運動に与える影響も解析する。

この理論を応用して最短時間で最大数のロボットを移動させるための群れ形成力を定式化し、数百万台の超多数移動ロボットの制御手法として確立する。

4. 研究成果

(1) 群れの挙動の相転移の現象の解明に対しては、個体数による群れの維持能力の変化と個体間の接続関係が相転換の主たる要因と仮定し、とくに群れの接続関係の変化を巨視的に記述するモデルを開発した。これは群れの中で接続している2個体間の位置と速度に基づき、近い将来の2個体間に最大距離を推定する近似モデルである。このモデルにより、どの接続が将来分断する可能性が高いかが表現され、群れの安定性と接続変化の予想が可能になった。この近似モデルは実際の群れ挙動と比較し、その近似精度を検証した。

(2) GPGPUを用いた群れ挙動の数値計算と可視化システムを開発した。百万個体の場合でもほぼリアルタイムで群れの数値計

算と画面への表示が可能となった。

(3) 超多数の移動ロボット制御法を改善した。キーとなるアイデアは二つある。(A) 上述の個体間の最大距離推定モデルを利用し、最大距離が大きくなる個体に対してはより大きな群れ形成力を発生させることより、群れの維持能力を向上した。(B) 群れの密度が高いときには、外乱に対する群れの維持能力が低くなる。これを回避するために、群れ形成の相互作用対象ロボット数を限定することにより、群れの密度を下げ、群れの安定性を高めることを実現した。

(4) 実ロボットを考慮すると、ノイズを含んだセンサデータからそれ自身の位置と速度を推定する必要がある。本研究では推定精度を高めるために、群れの個体間で情報共有することを仮定し、他のロボットの推定値をそれ自身の位置と速度の推定に利用する、分散カルマンフィルタを開発した。

従来研究では局所的な相互作用のみでは群れは分離しやすいことが示され、大きな群れを形成するためには大域的な目標点か相互作用が必要だとされていた[3]。本研究では研究課題を解決することにより群れ現象と動力学的理解を深め、局所的な相互作用のみで数百万規模の群れを実現する。

一方、ロボット工学の視点では今後さらに小型化、低価格化、ネットワーク化が進むことが予想され、将来的に数百万のロボットを同時に制御することもあるだろう。本研究はそのときに必要とされる理論を与えるものである。

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 1件)

(1) Keitaro Naruse, "Velocity Correlation in Swarm Robots with Directional Neighborhood", *Advances in Intelligent Systems and Computing* Volume 194, 2013, pp 843-851

[学会発表](計 8件)

(1) Shigekazu Fukui and Keitaro Naruse, "Swarm EKF Localization for a Multiple Robot System with Range-Only Measurements", *Proc. of The 14th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, USB, 2013
(2) Keitaro Naruse and Shikezazu Fukui, "Swarm EKF Localization for a Multiple Robot System with Range-Only Measurements", *Proc. of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 796-801, CD-ROM, 2013

(3) Yuhei Akama, Keitaro Naruse, "Development of link tension index for flocking agents", *Proc. of the 8th International Conference on Bioinspired Information and Communications Technologies*, pp. 271--274 (2014) doi: 10.4108/icst.bict.2014.257950
(4) Atsunori Maruyama, Keitaro Naruse, "Feasibility study of weeding robots in rice fields inspired by natural ducks", *Proc. of the 8th International Conference on Bioinspired Information and Communications Technologies*, pp. 378--381 (2014) doi: 10.4108/icst.bict.2014.257897
(5) Atsunori Maruyama, Keitaro Naruse, "Development of small weeding robots for rice fields", *Proc. of System Integration (SII)*, 2014 IEEE/SICE International Symposium on pp. 99--105, (2014) DOI: 10.1109/SII.2014.7028019
(6) Kazuya Tamura, Keitaro Naruse, "Unsmooth field sweeping by Ballistic random walk of multiple robots in unsmooth terrain", *Proc. of Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS)*, 2014 Joint 7th International Conference on and Advanced Intelligent Systems (ISIS), 15th International Symposium on, pp. 585--589 (2014) DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044837
(7) Keitaro Naruse, "Predicting the Disconnection of Flocking Agents in a Swarm", *Proc. of 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1783 - 1788, 2015 DOI: 10.1109/AIM.2015.7222805
(8) Keitaro Naruse, "Prediction of Swarm Disconnection of Flocking Agents," *Proc. of The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM2015)*

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成瀬継太郎 (Naruse, Keitaro)

会津大学コンピュータ理工学部・上級准教授

研究者番号：10301938

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：