

[研究助成 (A)]

シーブドッグシステムから紐解く、 群ロボットの階層型マエストロ制御法の創成

Design of hierarchical-maestro controller of swarm robots motivated by the sheepdog system

2191016



研究代表者

大阪大学大学院 工学研究科

助教

末岡 裕一郎

[研究の目的]

本研究の目的は、群ロボットに対して人間がその行動を指示できるシステムを構築することである。ロボットに求められるタスクは、使用する側の置かれている状況や、タスク量によって変化する。そのような状況に対し、「もうちょっと、こんな感じで動いて!」という人間の意図と調和するシステム設計が本申請の狙いとなる。

本研究ではシーブドッグシステムという、人が羊の群れを操る際に機動性の高い犬を用いる手法をヒントに、群ロボットを足の速いロボット（マエストロと呼ぶ）を用いて指揮すること、そして人がマエストロに指示を出し、群れ全体の行動を柔軟に操るシステムを構築する。以下、マエストロは「犬ロボット」と呼称する。まず、本研究目的を達成するために、シーブドッグシステムを参考にした、犬ロボットと群ロボットの行動モデル設計に取り組んだ。解析・実験を通じて、犬ロボットの動かし方と群ロボットのモデル調整によって、群れのサイズや群れの行動ルートに介入できることが分かったため報告する。

以下では、**1. シーブドッグシステムのモデリングと安定性解析**，それに基づき、**2. 人が介入する群ロボットシステムの設計**を述べ、最後に今後の展開として、**3. 議論：群れの動きに介入できる、無脳ロボット群の設計へ拡張**を

述べ、本報告書をまとめる。

[研究の内容, 成果]

1 シーブドッグシステムのモデリングと安定性解析

シーブドッグシステムを参考に群ロボットシステムのモデル（群ロボットと犬ロボットの行動モデル）を構築し、システムの振る舞いを解析する。

1.1 シーブドッグシステムのモデリング

群ロボット側の行動モデルを、お互いに群れる、犬ロボットから離れるという行動を基に、犬ロボット側の行動モデルを、群れの重心に近く、ゴールから離れるという行動を基に以下のようにモデル化する。

・群ロボットの行動モデル

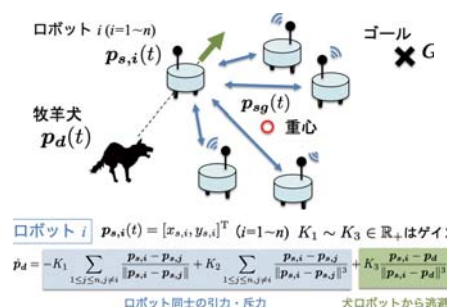


図1 群ロボットの行動モデルの設計

・犬ロボットの行動モデル

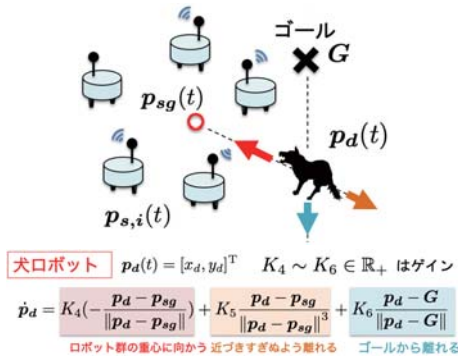


図2 犬ロボットの行動モデルの設計

1.2 システムの振る舞い：安定性解析

犬ロボットを用いた群ロボットの誘導が成功するかを、システムの安定性を解析することで調べる。ここでの解析では、犬ロボットと群ロボットをそれぞれ1体ずつで解析を行い、図3のように、平衡状態でも2パターン存在することがわかった。詳細な説明は論文[c]を参照されたい。

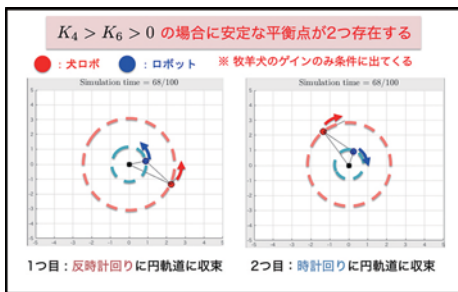


図3 システムの収束の様子

1.3 犬のコントローラ設計による群ロボットの行動の違い

システムの安定性解析を通じて、犬のコントローラ設計（スピード）が、羊の動かし方に影響を及ぼすことが分かった。具体的には以下の通りである。

- ・犬を早く走らせると、図4(a)のように目標点の周りを小さく動く。
- ・犬を遅く走らせると、図4(b)のように目標点の周りを大きく動く。

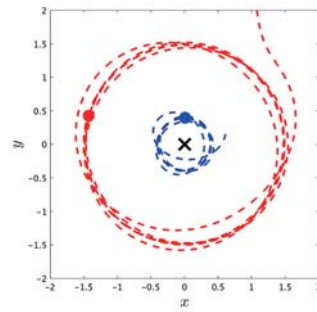


図4(a) 収束半径の小さい結果

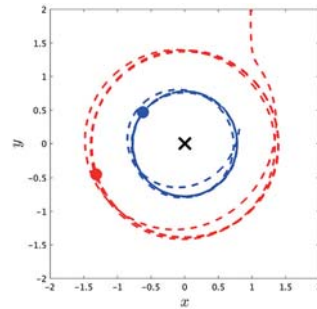


図4(b) 収束半径の大きい結果

2 人が介入する群ロボットシステムの設計

ここでは、システムを群ロボットシステムに拡張し、人の介入（操作性）に関して議論する。

2.1 犬ロボット：1体，群ロボット：5体のシミュレーション解析

本節では、シミュレーション解析を通じて、群ロボットを誘導する問題に取り組んだ。具体的には、群ロボットの「サイズ」と「動く場所」を制御する解析に取り組んだ。

図5(a)に小さい群れサイズで、小回りする結果を、図5(b)に大きい群れサイズで、小回りする結果を、図5(c)に小さい群れサイズで大回りする結果を示す。実線は群れの重心の軌跡を表し、点線は群れサイズを表現している。

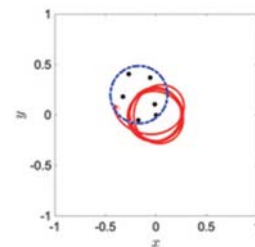


図5(a) 群れの行動制御の結果：小さいサイズにて、小回りで巡回。

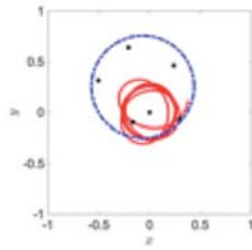


図 5(b) 群れの行動制御の結果：
大きいサイズにて、小回りで巡回。

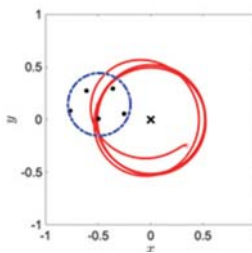


図 5(c) 群れの行動制御の結果：
小さいサイズにて、大回りで巡回。

これらの結果は、人が群ロボの動きとサイズに簡単に介入できることを示唆している。

2.2 実機検証

ここでは、解析結果の妥当性を示すために、実機実験を行う。ロボットは、pololu 社の m3pi ロボットを用い、図 6、図 7 に示すようにモーションキャプチャにてロボットの動きをオンラインで取得し、制御を加える。実験は、 3×2.5 [m] の屋内領域の周囲に 5 つの赤外線カメラを設置し、誘導実験を行った。

図 8 に実機実験の一例を示す。群ロボットは解析と同様の動きを示すことが分かった。そして、一連の解析、実機実験を通じて、群ロボットの動きとサイズに人が介入する設計が可能だと分かった。

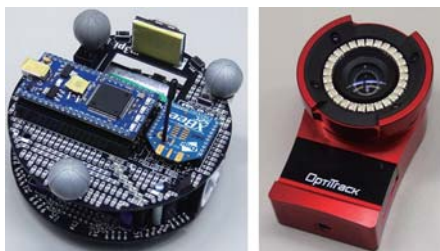


図 6 開発ロボットとカメラ：3つの反射マーカ（左図）とカメラ（右図）でロボットの位置・姿勢を取得する。

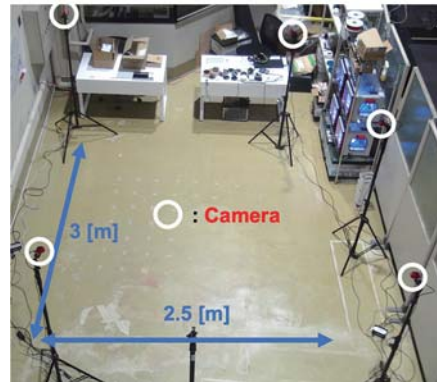


図 7 実験システムの全体像

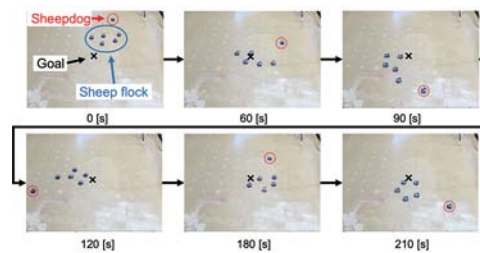


図 8 群ロボットの実験結果の一例

3 議論：群れの動きに介入できる、無脳ロボット群の設計へ拡張

人が群ロボットの動きのみに操作を加えるシステムであれば、シープドッグシステムを参考にしたシステムより、シンプルかつ安価で設計できる可能性がある。そこで、磁石デバイスを用いた、群ロボットと犬ロボットの相互作用を設計し、基礎実機実験を行った。

- ・群ロボットの設計：外側が全て S 極になるように 10 個のネオジム磁石を埋め込むことで、磁石の反発力を利用してロボット同士の斥力、および犬からの斥力を設計した。
- ・犬ロボットの設計：ロボットに磁石を取り付け、ロボット群を磁石の反発力で追い立てるよう、また人の意思がシステムに介入できるよう外部コントローラを設計した。

本実機実験を通じて、群ロボットにマイコンや計算機を搭載せずとも、シープドッグのような群ロボットのナビゲーションを実現できる可能性が示唆された。今後は、マイコンレスシステムの設計を進めていき、人が介入できる群ロ

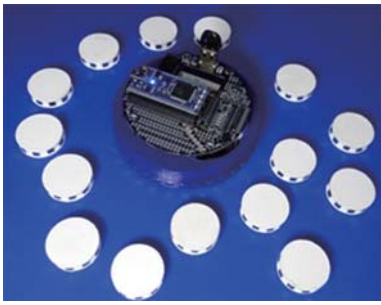


図9 犬ロボットとマイコンレス群ロボットの開発

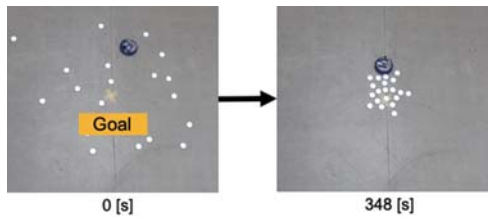


図10 目標地点へ誘導する実験結果

ロボットシステムのミニマル構築法を設計する予定である。

[今後の研究の方向, 課題]

まとめ 一連の研究を通じて分かったことは以下の3つである。

1. 犬ロボットの速度を調整すると、多数のロボット群のナビゲーションルートを制御できる。
2. 群ロボットの引力パラメータを調整することで、群れのサイズを制御できる。
3. 群れの動きのみに人が介入したいケースでは、システムはより単純に設計できる可能性がある。

今後の予定 今後は、人が介入できる群ロボットシステムのミニマル（最小限の）構成を探していく予定である。

謝辞 本研究実施にあたり、大阪大学大学院工学研究科 角田祐輔氏、重吉比呂氏には実験システム構築・実施において多大な尽力をいただいた。ここに謝意を表する。

[成果の発表, 論文等]

解説記事

- [a] 末岡, 角田: シーブドッグシステムから紐解くマルチエージェントシステムの制御, 計測と制御, 59(2), pp.125-130, 2020.

学術雑誌掲載論文

- [b] Y. Sueoka, T. Tahara, M. Ishikawa, K. Osuka: Statistical Exploration of Distributed Pattern Formation Based on Minimalistic Approach, Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), 31 (6), pp. 905-912, 2019.
- [c] 角田, 末岡, 和田, 大須賀, 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の機動制御法の理論解析, 計測自動制御学会論文集, 55(8), pp. 507-515, 2019.

国際学会発表

- [d] Y. Tsunoda, Y. Sueoka, T. Wada, K. Osuka: Sheepdog-type robot navigation: Experimental verification based on a linear model, Proc. of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.1144-1149, 2020.
- [e] Y. Sueoka, K. Osuka: Exploration of role division in ant-like foraging for dynamic food source switching, ALIFE2019, 2019.
- [f] Y. Sueoka, K. Osuka: One approach to implicit observer: estimation of subpopulations in foraging by ants-like colony, AMAM2019, B18, 2019.
- [g] Y. Tsunoda, Y. Sueoka, K. Osuka: Exploration of sheepdog controller for sheep flock navigation based on the model derived from a real shepherding, AMAM2019, B17, 2019.
- [h] F. Nose, Y. Sueoka, D. Nakanishi, K. Osuka: Experimental Study on Sensing Fin Pressure for Distributed Control of a Fish-Type Swimming Robot, SICE Annual Conference 2019, 2019.
- [i] Y. Tsunoda, Y. Sueoka, Y. Tsunoda, K. Osuka: Analysis of sheepdog-type navigation for minimal sheep model, Swarm 2019, pp.197-200, 2019.
- [j] T. Kida, Y. Sueoka, K. Osuka: Demonstration of swarm alignment behavior by distributed acoustic robots, Swarm 2019, pp.201-202, 2019.

国内学会発表

- [k] 武部, 末岡, 重吉, 大須賀: 遠心力による車輪径可変ロボット提案, 第25回自律分散システム・シンポジウム, 2C1-RM3, 2020.
- [l] 末岡, 石谷, 沖本, 南, 大須賀: 捕食者からの逃避戦略の学習で紐解く群れ行動の獲得, 第25回自律分散システム・シンポジウム, 1A1-BhS7, 2020.
- [m] 末岡, 石谷, 南, 大須賀: マルチエージェント

- 強化学習で切り拓く群れ行動の獲得, 第7回制御部門マルチシンポジウム, 1B1-2, 2020.
- [n] 野瀬, 末岡, 中西, 大須賀: 尾ビレのしなり感覚に基づく魚型ロボットの遊泳制御, 第7回制御部門マルチシンポジウム, 2H2-1, 2020.
- [o] 沖本, 末岡, 石谷, 大須賀: 環境に応じたターゲット探索行動の機械学習的アプローチ, 第7回制御部門マルチシンポジウム, 3A2-4, 2020.
- [p] 木田, 末岡, 大須賀: 音の到達時間差を活用した群ロボットの整列行動の実機検証, 第37回日本ロボット学会学術講演会, 1H3-06, 2019.
- [q] 石谷, 末岡, 角田, 大須賀: 非線形なシーブドッグシステムにおける安定性解析, 第37回日本ロボット学会学術講演会, 1H3-07, 2019.
- [r] 重吉, 末岡, 木田, 角田, 大須賀: 磁石結合・分離機構を搭載した非自走型群ロボットによる協調行動の実現, 第63回自動制御連合講演会, 1G3-02, 2019.
- [s] 花原, 野瀬, 末岡, 中西, 大須賀: ヒレ型遊泳ロボットに向けたワイヤ駆動型飛び移り座屈機構の提案, 第63回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 765-767, 2019.