

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14183

研究課題名（和文）Cluster-wise Strategyで切り拓く群れの自在ナビゲーション

研究課題名（英文）Flexible navigation of swarms based on the cluster-wise strategy

研究代表者

末岡 裕一郎（Sueoka, Yuichiro）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50756509

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、群ロボットを目的地までナビゲートする、できるだけシンプルかつ汎用性の高い方法：Cluster-wise Strategyを提案し、有効性を検証する。具体的には、2種類のロボット（ナビゲータロボットとワーカロボット）の導入を提案し、ナビゲータロボットがワーカロボット群を間接的に目的地までナビゲートするためのワーカロボットの行動モデル、ナビゲータロボットのコントローラを提示する。シミュレーションでの検証を通じて、1つの目的地、そして2つの目的地にワーカロボット群を誘導できることを示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提示しているコントローラは、ロボットの数や搭載デバイスに依存しないため、汎用性の高い群ロボットナビゲーション手法だと考えられる。そのため、ロボットに機械的な制約が多く加わる状況（例えば、月面や災害現場など）における群ナビゲーションへの応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose and validate the effectiveness of a simple and versatile method, what we call the cluster-wise strategy, for navigating swarm robots. Specifically, we propose the introduction of two types of robots, namely the navigator robots and the worker robots, and present a behavior model for the worker robots, as well as a controller for the navigator robot, to indirectly navigate the worker robots to a predetermined destination. Through simulations, we demonstrate the guidance of a group of worker robots to one or two destinations.

研究分野：制御工学

キーワード：自律分散 群ロボットシステム ヘテロ性

### 1. 研究開始当初の背景

群ロボットシステムは、多数のロボットを使用して、広範囲の探索や協調運搬といったタスクを実行することが期待されています。また、システムの一部の故障に頑健であること、規模も柔軟に対応できる性質を有しています。本研究では、群ロボットのナビゲーション問題を対象とし、群ロボットを目的地までナビゲートするシンプルかつ汎用性の高いコントローラとシステム設計を行います。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、群ロボットを目的地までナビゲートする、できるだけシンプルでかつ汎用性の高い方法：Cluster-wise Strategy を提案し、有効性を検証することです。提案手法を用いて、1種類のコントローラのパラメータを調整するのみで、複数パターンのナビゲーションを実現することを目指します。具体的には、群れを一つの集団として誘導することと、群れを複数の集団に分けてそれぞれを独立に誘導することを同様の形のコントローラで実現することを目指します。

### 3. 研究の方法

2種類のロボットを用いることを提案します。複数種類のロボットを導入するきっかけは、シーブドッグシステムです。シーブドッグシステムは、犬が羊の群れに間接的に刺激を加えることで、羊の群れを巧みに目的地に誘導します。犬をナビゲーターロボット、羊の群れをワーカロボット群と捉え、両者の間の相互作用を設計し、できるだけシンプルで汎用性の高い群ナビゲーションシステムを提案します(図1左)。シミュレーションを通じて有効性を解析し、いくつかのパラメータがナビゲーションに与える影響を検証します。

### 4. 研究成果

#### (1) ワーカロボット群の行動モデル、ナビゲーターロボットのコントローラの設計

ワーカロボット群の行動モデルとナビゲーターロボットのコントローラを設計します。ワーカロボット群は、ロボット同士の衝突に基づいて動く行動モデルを設計します。ワーカロボットはナビゲーションのための知能を一切与えません。言い換えると、ワーカロボットは別のワーカロボット、ナビゲーターロボット、目的地を認識せず、別のワーカロボットやナビゲーターロボットと通信も行いません。

ナビゲーターロボットは、ワーカロボット群、目的地の方向の情報を取得し、ワーカロボット群とは通信を行いません。また、ワーカロボット各個体に対しての情報をを用いるのではなく、ワーカロボット群を1つの塊として捉え、塊の方向のみを用います。これによって、ナビゲーターロボットの観測情報の数を大幅に減らすことが可能となります。そして、ナビゲーターロボットは、ワーカロボット群と目的地の方向情報に基づき、ワーカロボット群を押して動かすコントローラを設計します。具体的には、図1右に示すように、ナビゲーターロボットから見てワーカロボット群が目的地(work area)より左側に位置する場合、群を右側に動かすために、ナビゲーターロボットは群の左に回りこみ、群を右に押すコントローラを設計します。逆に、ワーカロボット群が目的地より右側に位置する場合、群を左側に動かすために、ナビゲーターロボットは群の右に回りこみ、群を左に押すコントローラを設計します。これをナビゲーション中に切り替えます。

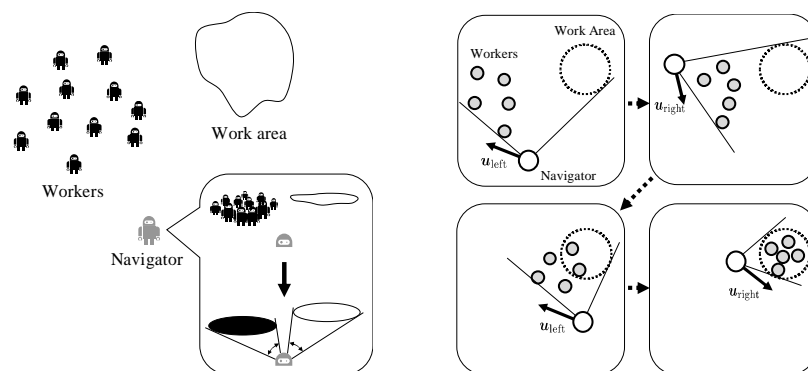


図1：ナビゲーターロボットによるワーカロボット群の誘導システムの提案と、誘導のためのナビゲーターロボットのコントローラ設計 ( $u_{right}$  と  $u_{left}$  のスイッチング)

(2) 1つの目的地へのナビゲーションタスクの結果

ワーカロボットの数を20台、50台、80台と変化させながら、シミュレーションを行いました。ロボットの台数が50台の場合のシミュレーション結果の一例を図2に示します。図2から、ナビゲータロボットが作業ロボット群を押しながら作業エリアへ誘導できていることが確認できます。また、ワーカロボットが20台の場合も50台の時と同様にナビゲーションに成功することもわかりました。一方で、ワーカロボットが80台の場合は誘導に失敗することがわかりました。その時のシミュレーション終了時の様子を図4左に示します。図4左から、目的地のエリアがワーカロボットで埋め尽くされていることがわかります。そのため、ワーカロボットの数に対して目的地のエリアが十分に広ければ誘導が可能だと考えられます。

そして、ワーカロボット数が20台、50台、80台のケースに対して、目的地(エリア)に誘導できたワーカロボットの割合とナビゲーションに要した時間を図3に示します。ロボットの台数が20台、50台の場合、すべてのワーカロボットを目的地に誘導できていることがわかります。また、目標値として設定していた2,500以下のステップで誘導できていることも確認できます。一方、ロボットの台数が80台の場合は、誘導できていないこともわかります。

ナビゲーションが失敗するいくつかのパターンを図4真ん中と図4右に示します。まず、図4真ん中のパターンは、図5におけるナビゲータロボットの $\theta_g$ が小さいケースに相当します。ナビゲータロボットがワーカロボット群を目的地の近くまで誘導した後、ナビゲータロボットと1台のワーカロボットが、あるステップから目的地エリア外の円軌道を移動し続けていることがわかりました。一方、図4右の場合は、 $\theta_g$ が大きいケースに相当し、ナビゲータロボットがワーカロボットに十分に近づくことができず、ワーカロボットとの衝突が発生していないことがわかりました。 $\theta_g$ が大きいケースは、ナビゲータロボットはワーカロボットに対して大きく回り込む動作を行うため、動作後のナビゲータロボットの中心とワーカロボットの距離が大きくなります。この距離が、ナビゲータロボットの大きさでワーカロボットの大きさの和より大きければ衝突が発生しません。そのため、ワーカロボット群の誘導に失敗したと考えることができます。

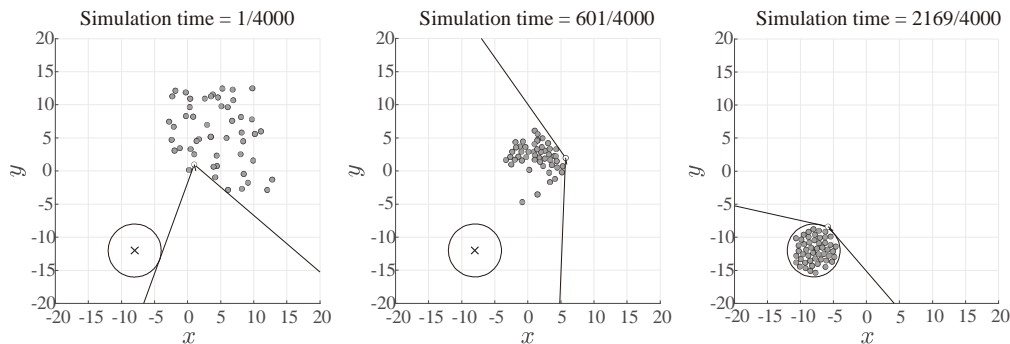


図2：ナビゲータロボットによるワーカロボット群の誘導の様子  
(目的地エリア、円の領域にワーカロボット群を誘導する様子)

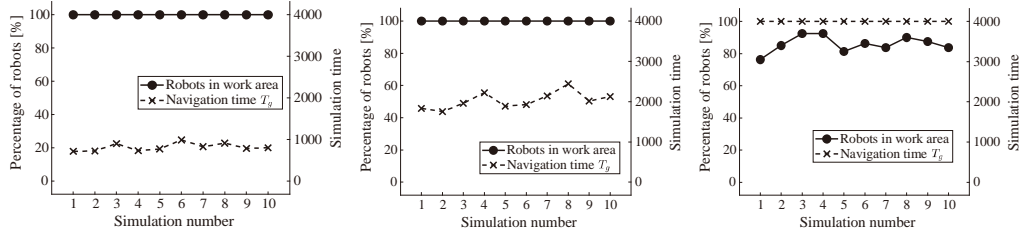


図3：ワーカロボットの台数(左：20台、真ん中：50台、右：80台)に対して、ナビゲーションに要した時間と目的地に存在するワーカロボット数の結果

一連のシミュレーションから、ワーカロボットの大きさや台数に対して目的地エリアが十分に広い場合、適切な  $\theta_g$  を設定することでワーカロボット群を誘導することが可能であるとわかりました。 $\theta_g$  の適切な値は、ロボットのサイズなどによっても変化する可能性があるため、適切な  $\theta_g$  を決定するための設計理論は今後必要になると考えています。ただし、 $\theta_g$  の適切な値は環境パラメータや各作業ロボットの位置関係によっても変化するため、あらかじめ  $\theta_g$  を設計することは難しい可能性があります。その解決策として、 $\theta_g$  の値を動的に調整するアプローチが有効だと考えられます。図4真ん中や図4右のような状況に対しては、ある周期でナビゲーターロボットの行動が切り替わります。この周期を検出し、 $\theta_g$  の値を動的に調整することができれば、ロボットの台数が変化した場合、環境が変化した場合にも誘導が可能になると考えられます。

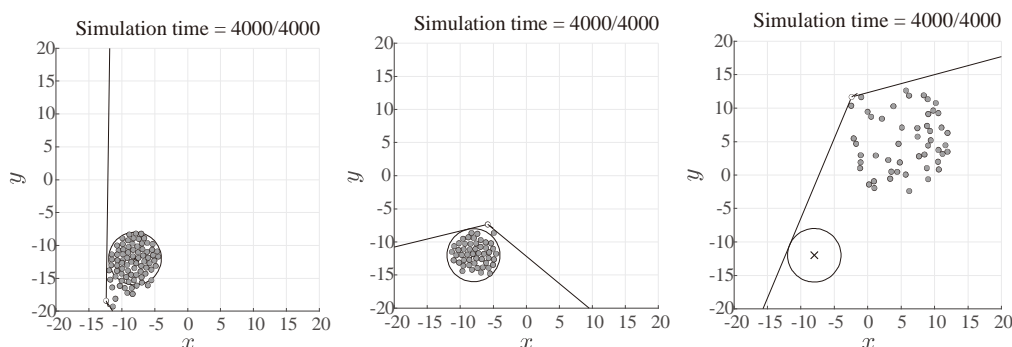


図4：ワーカロボット群の誘導失敗のケース

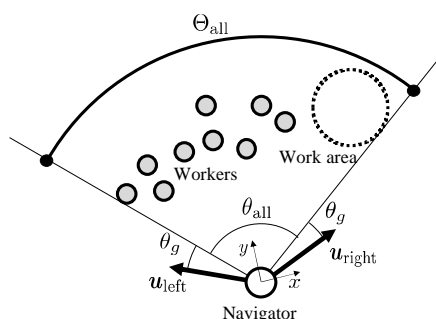


図5：ナビゲーターロボットのコントローラにおけるパラメータ ( $\theta_g$ )

### (3) Cluster-wise Strategy に基づく複数の目的地へのナビゲーションタスクの結果

前節にて説明したナビゲーターロボットのコントローラは、ワーカロボット群全体を1つの目的地まで誘導できることがわかりました。この時、ナビゲーターロボットはワーカロボット群全体を含む角度を使用しています。このことから、ワーカロボットが部分的に含まれる角度を用いれば、その角度の範囲に含まれるワーカロボットのみを選択的に誘導可能になることが考えられます。言い換えるならば、1つあるいは2つの目的地(エリア)への誘導を、同じコントローラから実現できることが考えられます。これが、Cluster-wise Strategy の根幹です。

具体的に説明します。ナビゲーターロボットはワーカロボット群を分割・誘導する際に片方の目的地  $A_1$  のみに着目し、一部のワーカロボットを  $A_1$  に誘導します。このとき、図6(a)の場合ではナビゲーターロボットから見て  $A_1$  が左側に位置しているため、ワーカロボット群に対して、区切りとなる角度を設定し、その角度よりも左側に存在するワーカロボットを誘導の対象とします(ただし、その角度をまたいで存在するワーカロボットは対象外とします)。この角度をワーカロボット群の分割角度と呼ぶことにします。一方で、図6(b)の場合では、 $A_1$  と  $A_2$  が同じ方向に位置しているため、ワーカロボット群を左右に分割する恩恵が少ないと考えられます。したがって、この場合、ワーカロボット群を分割せず、すべてのワーカロボットを誘導の対象とします。

ナビゲータロボットが、上記のように状況に応じて分割角度を用いるかどうかを決定し、さらに、着目する目的地を  $A_1$  と  $A_2$  であるステップごとに切り替えながら誘導を行うことで、 $A_1$  と  $A_2$  の両方にワーカロボット群を分割しながら誘導することを実現します。図7はシミュレーション結果の一例であり、2つのエリアにワーカロボット群を誘導できていることがわかります。

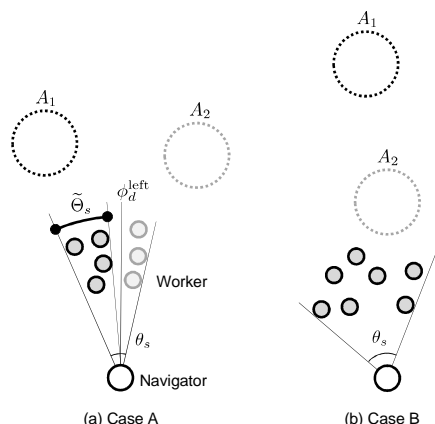


図6：2つの目的地（エリア）の位置関係によって、ワーカロボット群を分割するかどうか決定する方法

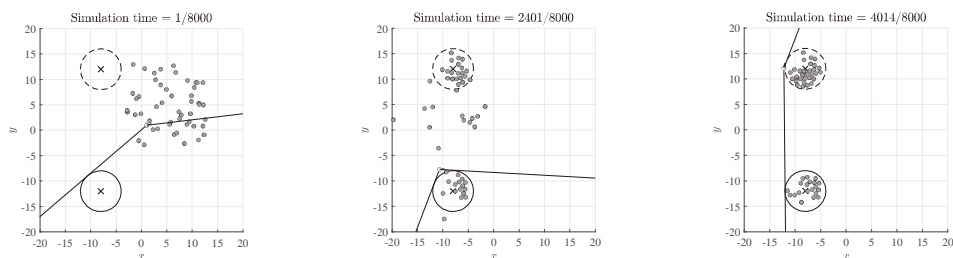


図7：2つの目的地（エリア）にワーカロボット群を誘導する様子

#### (4) まとめ

本研究の目的は、群ロボットを目的地までナビゲートする、できるだけシンプルでかつ汎用性の高い方法：Cluster-wise Strategy を提案し、有効性を検証することです。そのために、ナビゲータロボットがワーカロボット群を自在に分割し、誘導するためのワーカロボットの行動モデル、ナビゲータロボットのコントローラを提示しました。そして、シミュレーションを行った結果、1つの目的地、そして2つの目的地にワーカロボット群を誘導できることがわかりました。

本研究成果は、円形でかつ衝突により移動できる機能をもったワーカロボットであれば、2つの目的地まで分割し、誘導できることを示唆しています。衝突により移動する機能は、一般的な移動ロボットであれば実装が容易な機能と考えられます。今後は、ワーカロボットの形状が円形でない場合についての検証、ワーカロボットを3つ以上のエリアへ分割・誘導できる手法を構築することが必要です。さらに、ロボット実機を用いて上記の検証課題に取り組み、ワーカロボット群を自由に分割でき、高い汎用性をもつナビゲータロボットのコントローラの構築の検討を進めていきます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichiro Sueoka, Naoto Takebe, Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka	4. 巻 35
2. 論文標題 Body Stiffness Control for Using Body-Environment Interaction with a Closed-Link Deformable Mobile Robot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 362, 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p0362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUEOKA Yuichiro, ISHITANI Makihiko, OKIMOTO Masataka, SUGIMOTO Yasuhiro, OSUKA Koichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Emergent Mechanism of Swarms Based on Machine Learning Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 73, 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.58.73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yi Zhang, Yuichiro Sueoka, Yusuke Tsunoda, Hisashi Ishihara, Koichi Osuka
2. 発表標題 A Decentralized Approach to Gentle Cooperative Human Transportation with Mobile Robots Equipped with Flexible Tactile Sensors
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichiro Sueoka
2. 発表標題 Biological-like swarm systems designed from a non-biological approach
3. 学会等名 The Twenty-Eighth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 末岡裕一郎, 加藤 佑基, 近藤 翔太, 吉田 尚弘, 木村 魁斗, 大須賀 公一, 筑紫 彰太, 谷島 諒丞, 村本 いづみ, 永谷 圭司, 浅間 一
2. 発表標題 複数のバックホウ・ダンプトラックによる動的協働AI -自律分散的なチーム編成と新たな行動の獲得に向けた考察-
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田尚弘, 末岡裕一郎, 石原尚, 大須賀公一
2. 発表標題 要整地環境における経路確保に向けた物体の協調除去システムの設計
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村魁斗, 末岡裕一郎, Yi Zhang, 大須賀 公一
2. 発表標題 小型自律移動ロボット群による不整地環境下での協調搬送に向けた能動・受動ハイブリッド伸縮機構の設計
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪本徹太, 末岡裕一郎, 伊東和輝, 大須賀公一
2. 発表標題 頑健な群ロボットシステムに向けたスタック協調回避行動の設計
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷川泰亮, 末岡裕一郎, 大須賀公一
2. 発表標題 多様な対象物の協調積載・搬送に向けた群ロボット：DUCKS-Chi Idrenの開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末岡裕一郎, 原田高歩, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 伸縮機構を搭載した高出力協調搬送ロボットの開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千田哲平, 沖本将崇, 末岡裕一郎, 大須賀公一
2. 発表標題 環境変化に臨機応変に対応する協調搬送行動のための Attention-based Neural Network の設計
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪本徹太, 末岡裕一郎, 大須賀公一
2. 発表標題 動的状況変化に対応する頑健性を持った群モジュラシステムへのアプローチ -クラッチ機構によるアクティブ・パッシブ搬送モード切り替えの実現-
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Yusuke Tsunoda, Mitsuki Okada, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka
2. 発表標題 Proposal of minimal approach on swarm navigation with heterogeneity
3. 学会等名 SWARM 2021: The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Sueoka, Teppei Senda, Yusuke Tsunoda, Koichi Osuka
2. 発表標題 Design of an experimental platform to control simple swarm robots from environmental stimuli
3. 学会等名 SWARM 2021: The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------