

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：54701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19902

研究課題名（和文）群ロボットにおける「働かないロボット」の創発と長時間実験による優位性検証

研究課題名（英文）Emergence of idle robots in a multi-robot system and its verification by long-term experiments

研究代表者

村山 暢（Murayama, Toru）

和歌山工業高等専門学校・知能機械工学科・准教授

研究者番号：30709176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では無線通信によってネットワークを構成する群ロボットを対象に、ネットワーク構造の耐故障性を高める手法を開発した。各ロボットが搭載するセンサの被覆面積を最大化するようなタスクでは、各ロボットの配置が疎になり、少数のロボットの故障によってネットワークの連結性が崩れてしまう。この問題に対して本研究は、少数のロボットがタスクに貢献する代わりに耐故障性に貢献するような役割、「働かない」動きをすることでシステム全体の耐故障性が大きく向上することを示した。耐故障性に貢献するような動作を実現するための自律分散制御則を考案した。故障や充電が必要となる長時間タスクにおいて提案手法が有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、ロボットは労働力の代替として期待されており、長い時間の運用が求められてきている。自律移動ロボットを長時間運用する際、故障のような突発的で予測できない停止や、バッテリーの充電のような一定期間ごとの停止は避けられない。本研究では群ロボットを対象に、耐故障性とタスク達成率のトレードオフを陽に考慮し、少数のロボットが耐故障性の役割を担うことで集団全体の耐故障性能とタスク達成を両立できることを明らかにした。さらに、耐故障性のあるネットワーク構造を自律的に構成するための自律分散制御手法を開発することで、群ロボットの実応用・社会実装へ近づけた。

研究成果の概要（英文）：In this study, a control method to improve the fault-tolerance of network structures is developed for multi-robot systems in which robots are networked by wireless communication. In tasks where the coverage of sensors mounted by each robot is maximized, the network connectivity is disrupted by the failure of a small number of robots due to the sparse configuration of robots. In response to this problem, this study shows that the fault-tolerance of the entire system can be significantly improved if a small number of robots play a role that contributes to fault-tolerance instead of contributing to the task. An autonomous decentralized control law was devised to achieve such a behavior that contributes to fault-tolerance. The effectiveness of the proposed method was confirmed in long-duration tasks that require fault-tolerance and charging.

研究分野：ロボティクス

キーワード：群ロボット 耐故障性 ネットワーク構造

## 1. 研究開始当初の背景

群ロボットシステムは個々のロボットの自律行動によって創発される群れ全体の協調作業が期待されている。個々のロボットは通信や観測(相互作用)によって他のロボットの状態を把握し自律移動を行うため、群れ全体で効率的な協調を実現するには相互作用グラフ構造が連結であることが求められる。ここでグラフ構造が連結であるとは、相互作用を辿ってシステム内の全てのロボットに影響を及ぼすことができることを指す。グラフ構造は各ロボットの自律移動に伴い動的に変化するため、グラフ連結性の維持手法が多く研究されている。

グラフ連結性はロボットの故障や外部からの攻撃によって崩れる恐れがあるため、グラフ構造を頑健化する連結度向上手法が提案されている。本研究のようにグラフ連結性を要求するタスクの場合、1台のロボットが故障するだけでシステム全体の性能が大きく劣化してしまうため、システムの頑健化は不可欠である。しかしながら、グラフ連結性を頑健化することは同時に相互作用距離の制約によって作業空間を狭めるため、広域での作業効率を悪化させる。各ロボットは通信や観測によって他のロボットの状態を得るため、頑健なグラフ構造ではロボットを広範囲に展開させることが困難となる。

特に、システムに長期間のタスクを行わせる際は故障を想定に入れることが重要である。短期間のタスクであればロボットの故障率を無視した瞬間的なタスク最大化制御が有効であるが、長時間のタスクではシステムの頑健性がタスク達成度に依存する。したがって、適切な頑健化を施すことでシステムの長時間タスク達成度が最大化されると予想される。

研究者は研究開始以前に、一部のロボットがタスク達成度を犠牲にしてシステムの頑健性に貢献するような振る舞いが、ロボット故障後のタスク達成度に効果的であることを確認した。すなわち、短期的にはタスクに貢献しない「働かないロボット」の存在がシステムを頑健化し、長期的なタスク達成度を向上させることが示唆されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の工学的な目的は群ロボットシステムの長時間タスク達成度を最大化するための自律分散制御手法を構築することである。ロボットの故障によって群ロボットシステムのタスク達成度が落ちることから、「働かないロボット」による適切なシステム頑健化がシステムの長時間タスク達成度に与える効果を検証する。

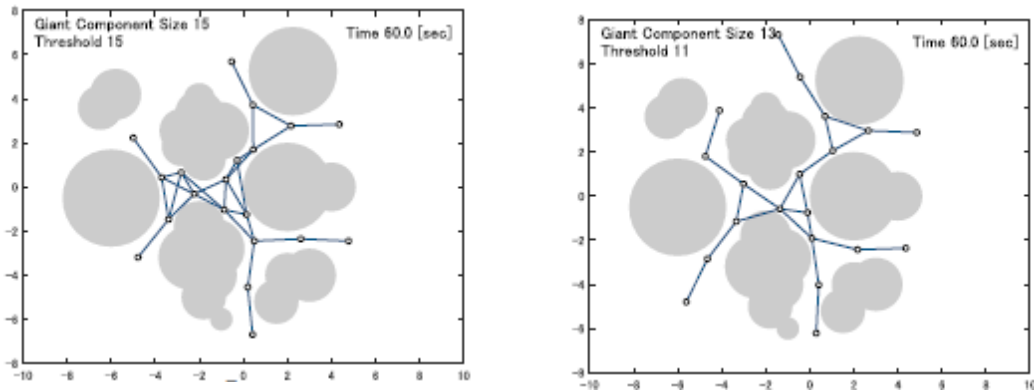
## 3. 研究の方法

(1) ロボットに対応する頂点を摂動させたグラフを表す固有値を基にして、所望のロボット間ネットワークを得る自律分散移動制御手法を開発する。ここでは、1台のロボットが故障した後のネットワーク構造に着目し、任意の割合のロボットが連結であることを目指した。研究者は事前に、摂動グラフを表すある行列の固有値・固有ベクトルが、ロボット故障後のネットワーク構造の特徴を示すことを確認していた。本研究ではこの事実をさらに数理的に解析し、所望のネットワーク構造になるための人工ポテンシャル関数を設計した。従来の連結性維持手法と類似の人工ポテンシャル法によって各ロボットの移動速度を与えるような制御則を設計した。

(2) 1台のロボットが故障した後も連結に保つロボットの割合について議論する。ここではセンサ被覆タスクを対象に、適切な連結割合とセンサ範囲、故障率の関係を調べた。背景で触れたとおり、全ロボットを連結に保つことは故障前の被覆効率を悪化させる一方、耐故障性を考えなければ故障後の被覆効率が悪くなる。ネットワーク連結割合、センサ範囲、ロボット故障率をパラメータとして群ロボットシステムをモデル化し数理的に解析した。

#### 4. 研究成果

まず、1台のロボットが故障した後のネットワーク構造が所望の割合のロボットを連結に保つような各ロボットの自律移動制御手法を開発した。図1に制御例を示す。ここでは(a)に全体の75%のロボットが連結となる場合、(b)全体の50%のロボットが連結になる場合の例を示している。どの1台のロボットをネットワークから除去しても所望の割合の連結成分を維持できることを確認できる。この内容について文献 [1] をはじめとしていくつかの論文発表・講演会発表をおこなった。



(a) 75%を維持する場合

(b) 50%を維持する場合

図1 提案手法によって制御された群ロボットのネットワーク構造

長時間のセンサ被覆タスクを想定して、センサ被覆範囲の期待値が最大となる連結維持割合を解析した。図2はあるケースにおける最適割合を示す。横軸はネットワーク耐故障性に貢献するロボットとそうでないロボットのセンサ被覆範囲の比を、縦軸はロボット故障率を示している。カラーバーは最適な連結維持割合を表し、50%（青色）から100%（黄色）を示している。ロボット故障率が低く、耐故障性に貢献しないロボットのセンサ被覆範囲が優位な場合において、50%の連結成分を維持することが最適であった。いくつかの場合で同様の解析を行い、50%の連結成分を維持できるネットワーク構造が最適である場合が多いことを確認した。この内容は文献 [2] にて発表している。

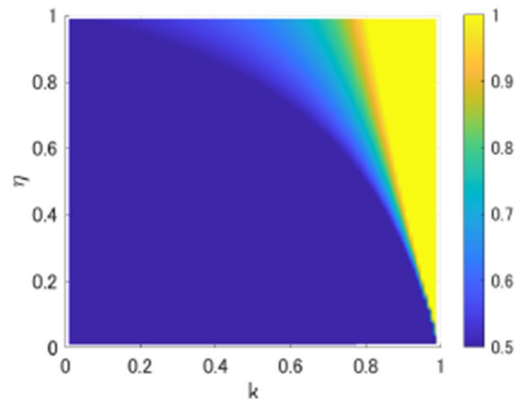


図2 最適な連結割合の例

また、上記の事実を検証するために、ネットワーク構造制御を行える実機ロボット群を開発した。具体的にはLEDと全方位カメラを搭載した移動ロボットを作成し、数台でのネットワーク構造制御を行った。この内容は文献 [3] をはじめ、いくつかの論文発表・講演会発表にて公開済みである。

以上より本研究は、少数のロボットがネットワークの耐故障性に貢献することで群ロボット全体の被覆タスクを最大化できることを示した。また、これを実現するネットワーク構造を自律分散的に構成するための移動制御手法を開発し、所望の動作が可能であることを理論的に解析した。

#### <引用文献>

Toru Murayama, Lorenzo Sabattini, Preservation of Giant Component Size After Robot Failure for Robustness of Multi-robot Network, Distributed Autonomous Robotic Systems. DARS 2021. Springer Proceedings in Advanced Robotics, Vol. 22. Springer, 2022, 415-428.

村山 暢、群ロボットにおけるセンサ被覆範囲最大化を目的としたネットワーク連結度の設計指針、日本ロボット学会 学術講演会 (RSJ2023)、2023

Toki Hiasa and Toru Murayama, Development of Experimental Multi-Robot System for Network Connectivity Controls, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 34, No. 5, pp.1185-1191, 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Murayama Toru	4. 巻 -
2. 論文標題 Distributed control for bi-connectivity of multi-robot network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/18824889.2022.2157194	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 Murayama Toru	4. 巻 27
2. 論文標題 Analysis of trade-off between network connectivity robustness versus coverage area of networked multi-robot system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 726~733
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-022-00794-3	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 -
1. 著者名 Hiasa Toki, Murayama Toru	4. 巻 34
2. 論文標題 Development of Experimental Multi-Robot System for Network Connectivity Controls	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1185~1191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2022.p1185	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 Murayama Toru, Sabattini Lorenzo	4. 巻 -
2. 論文標題 Preservation of Giant Component Size After Robot Failure for Robustness of Multi-robot Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS2021)	6. 最初と最後の頁 415-428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-92790-5_32	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 該当する

1. 著者名 Murayama Toru	4. 巻 -
2. 論文標題 Bi-Connectivity Improvement and Preservation for Multi-Robot Network Using Perturbed Algebraic Connectivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE2021)	6. 最初と最後の頁 394-399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Murayama Toru	4. 巻 -
2. 論文標題 Trade-Off Between Coverage Area and Connectivity Robustness of Networked Multi-Robot Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 5th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (AROB-ISBC-SWARM2022)	6. 最初と最後の頁 1834-1836
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Murayama Toru, Sabattini Lorenzo	4. 巻 53
2. 論文標題 Robustness of Multi-Robot Systems Controlling the Size of the Connected Component After Robot Failure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 3137 ~ 3143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.1052	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 該当する

1. 著者名 Murayama Toru	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamical improvement of network connectivity for multi-robot robustness using perturbed algebraic connectivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 781-785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEECONF49454.2021.9382705	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 -

1. 著者名 Murayama Toru	4. 巻 -
2. 論文標題 Preservation of Connected Component Size After Single Robot Failure to Robustify Networked Multi-robot Systems Considering Gateway Nodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE2023)	6. 最初と最後の頁 1084-1089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/SICE59929.2023.10354089	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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 平 詩園, 日浅 登貴, 村山 暢,
2. 発表標題 群ロボット実験システムのためのフルカラーLEDを用いたID識別
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日浅 登貴, 村山 暢,
2. 発表標題 自律分散的な実験システムによる群ロボット連結性制御手法の検証
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 (SS12022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日浅 登貴, 村山 暢,
2. 発表標題 群ロボットのネットワーク連結性維持手法の実験的検証
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 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎 碧, 村山 暢,
2. 発表標題 群ロボットネットワークの2重連結修復手法の改善
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 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日浅 登貴, 岡本 侑也, 村山 暢
2. 発表標題 ネットワーク連結性維持実験のための群ロボットシステムの開発と検証
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山 暢
2. 発表標題 群ロボットのネットワーク連結性制御のための識別子を用いないラプラシアン固有ベクトル推定手法の実装
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山 暢
2. 発表標題 摂動グラフラプラシアンを用いた群ロボットネットワークの2重連結維持制御
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 桂明, 村山 暢
2. 発表標題 摂動代数的連結度を用いた群ロボットネットワークの2重連結性の修復と維持
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西 伸規, 村山 暢
2. 発表標題 連結性を失った群ロボットネットワークの連結性修復移動制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村山 暢
2. 発表標題 群ロボットにおけるセンサ被覆範囲最大化を目的としたネットワーク連結度の設計指針
3. 学会等名 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩崎 碧, 村山 暢
2. 発表標題 群ロボットネットワークの2重連結性制御手法の実験検証
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
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 平 詩園, 村山 暢
2. 発表標題 群ロボット実験のためのLED点滅を利用した近傍ロボットの認識方法
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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今村 爽, 村山 暢
2. 発表標題 群ロボットの長時間運用を考慮した充電器割当制御手法
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩崎 碧, 村山 暢
2. 発表標題 充電のための移動を考慮した群ロボットの2重連結性制御実験
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023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			
イタリア	University of Modena and Reggio Emilia			