

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：34303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04199

研究課題名(和文) 障害物環境におけるネットワークの連結性を考慮した分散予測制御

研究課題名(英文) Decentralized predictive control while preserving network connectivity in obstacle environments

研究代表者

福島 宏明 (Fukushima, Hiroaki)

京都先端科学大学・工学部・教授

研究者番号：40377015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：操作者が1台のロボットに目標経路を与えると、他のロボットが無線通信による情報交換を行うことなく、分散的に計測ネットワークの連結性を維持しながら障害物環境下で目標経路に追従する手法に関する研究に取り組んだ。とくに、障害物が極度に密な環境でデッドロックが起こる、ロボットの移動が著しく低速・振動的である、という従来の問題点に着目して新たな制御アルゴリズムを提案した。これに加え、UAV群への適用を目的として、3次元空間に適用可能なアルゴリズムに着手し、数値シミュレーションと実機実験で有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数の自律移動ロボットによる協調作業の有用性は様々な分野で指摘され、社会的な意義のある研究分野である。このようなロボット群に必要な基本機能として、集団から分離することなく、なおかつ障害物や他のロボットとの衝突を回避しながら目標地点に到達することが挙げられる。この目的を達成するためには、障害物環境においてもロボット群のネットワークの連結性を維持しながら移動する制御アルゴリズムが必要となる。本研究では、従来と異なり、ロボット間の情報交換を必要としない独自の切り口で制御アルゴリズムを提案し、実機実験による検証も行った点で学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：I have studied on decentralized control of multiple mobile robots in obstacle environments while preserving the connectivity of the sensing network without data transmission through a wireless network, under the assumption that only one robot is given a target path of the group. A new control method was proposed to overcome limitations of the previous methods, such as deadlocks in extremely dense obstacle environments and the slow vibratory movements of robots. Furthermore, a control algorithm for 3D environments was proposed to apply groups of UAVs. The effectiveness of the proposed methods were verified in simulations and experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：ロボット群の制御

## 1. 研究開始当初の背景

複数の自律移動ロボットによる協調作業の有用性は様々な分野で指摘され、研究が進められている。このようなロボット群に必要な基本機能として、集団から分離することなく、なおかつ障害物や他のロボットとの衝突を回避しながら目標地点に到達することが挙げられる。それぞれのロボットの通信範囲、計測範囲は限定されていることから、通信や計測のネットワークの連結性が失われ、情報の流れが分断されてしまうと、群れが分裂し、一部のロボットが取り残されてしまう可能性がある。そこで、ロボット群のネットワークの連結性を維持する制御手法が精力的に研究されている(例えば[1][2])。具体的には、各ロボットをノードとし、2台のロボットが互いの通信範囲内に入っている場合にはエッジで接続されるグラフ構造を考える。このとき、任意の2ノード間を結ぶ経路が存在する、すなわちグラフの連結性が常に維持されていれば一部のロボットが群れから分裂することはない。ところが、既存の手法には以下の問題点がある。

A) 従来研究のほとんどは障害物を考慮していない。文献[2]では障害物が考慮されているが、連結性の維持や衝突回避について理論的な解析はなされていない。また、障害物環境を移動するためにグラフ構造をどう変えるかについては研究されていない。

B) 文献[1][2]の方法も含め、多くの方法においては、各ロボットは近傍のロボット、もしくは中央の制御システムと通信して情報交換を行い、全体のグラフ構造を推定する必要がある。ところがロボットの数が多くなると通信・推定にかかる時間の観点から実装が困難となる。また、このような情報交換を行える無線通信の環境が整っていない状況も想定する必要がある。

一方、研究代表者らは、操作者が1台のロボット(これをリーダーとよぶ)に目標経路を与えると、他のロボットが無線通信による情報交換を行うことなく、分散的に連結性を維持しながら障害物環境下で目標経路に追従する手法に関する研究に取り組んできた。ところが、障害物が極度に密な環境ではすべてのロボットが動けなくなるデッドロックが起こる、ロボットの移動が著しく低速・振動的である、2次元平面の移動に限定される、といった問題点が残されていた。したがって、ロボット間の通信による情報交換を行わず、局所的な計測情報に基づき、群れ全体の連結性を維持しながら環境に応じて柔軟に群れのネットワーク構造を変える移動制御手法について、さらなる研究を行うことが望まれる。

## 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、以下の課題に取り組むことが研究の目的である。

- (1) 障害物環境下で連結性を維持するロボット群の移動制御手法  
従来のデッドロックの問題、およびロボットの移動が著しく低速・振動的になる問題を考慮し、分散的に連結性を維持しながら障害物環境下で目標経路に追従するための新たな制御アルゴリズムを提案し、その有効性の検証を行う。
- (2) UAV 群に適用可能な3次元空間でのアルゴリズムの提案  
2次元平面の移動に限定されるという従来の問題点の解決のため、3次元空間における制御アルゴリズムを提案し、クアッドロータを使ったシミュレーションや実験で有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

- (1) 障害物環境下で連結性を維持するロボット群の移動制御手法

[デッドロック回避アルゴリズムの提案]

本研究で提案する制御アルゴリズムは、まず各ロボットの進行方向を標準的な人工ポテンシャル法によって決め、その後、様々な制約条件を考慮して移動量を決める。デッドロックが生じる原因として、ロボットの進行方向の決定が適切でないことが挙げられる。すなわち、ロボットが移動できる方向が存在するにも関わらず、移動できない進行方向が選ばれてしまうという問題がある。このことを踏まえ、本研究では与えられた移動量だけ進むことができる進行方向の集合を導出する方法を提案した。人工ポテンシャル法から求められた進行方向がこの集合に入っていない場合に進行方向を修正することにより、少なくともだけは進める方向、すなわちデッドロックが起きない進行方向を選ぶことができる。

[高速かつ滑らかな移動のための制御アルゴリズム]

本研究では、群れの目標経路は1台のロボットのみを与えられており、他のロボットは進むべき方向がわからず、近傍のロボットに離れないように動くしかない状況を考えている。従来のアルゴリズムの問題の1つは、近傍のロボットの動きを予測しないため、ロボット間の距離が許容最大値付近になり、それによって群れの前方のロボットが減速してしまうことであることがわかった。したがって、近傍ロボットの速度情報をつかうことにより、目標速度で移動可能なアルゴリズムを提案した。また、これにより、ロボット間の距離が許容最大距離になることが妨げられ、従来のネットワーク構造の変更アルゴリズムの有効性が低下するため、新たな方法を提案した。低速移動の他の原因として、移動量を決める際に速度が

制限される可能性もあるため、この問題に対処した移動量の決定法を提案した。さらに、振動的な移動に対処するために人工ポテンシャル関数の改善を行った。

(2) UAV 群に適用可能な 3 次元空間でのアルゴリズムの提案

従来の 2 次元空間の制御アルゴリズムを 3 次元に拡張することにより、UAV 群に適用可能な方法を提案した。ただし、従来のネットワーク構造の変更ルールの中で、3 次元に拡張が難しいものについては使用せず、新たな方法を提案した。また、ロボットが障害物を囲んでデッドロックに陥るという 2 次元空間では生じなかった問題に対処するための人工ポテンシャルの提案を行った。一方、(1)で述べたデッドロック回避やアルゴリズムの高速化については未だ着手しておらず、今後の課題となっている。

4. 研究成果

(1) 障害物環境下で連結性を維持するロボット群の移動制御手法

数値シミュレーション、および 7 台の全方向移動陸上ロボットに提案した方法を適用し、検証を行い、極度に道幅の狭い環境でもデッドロックすることなく、目標速度での移動が可能であることを確認した（下図参照）。

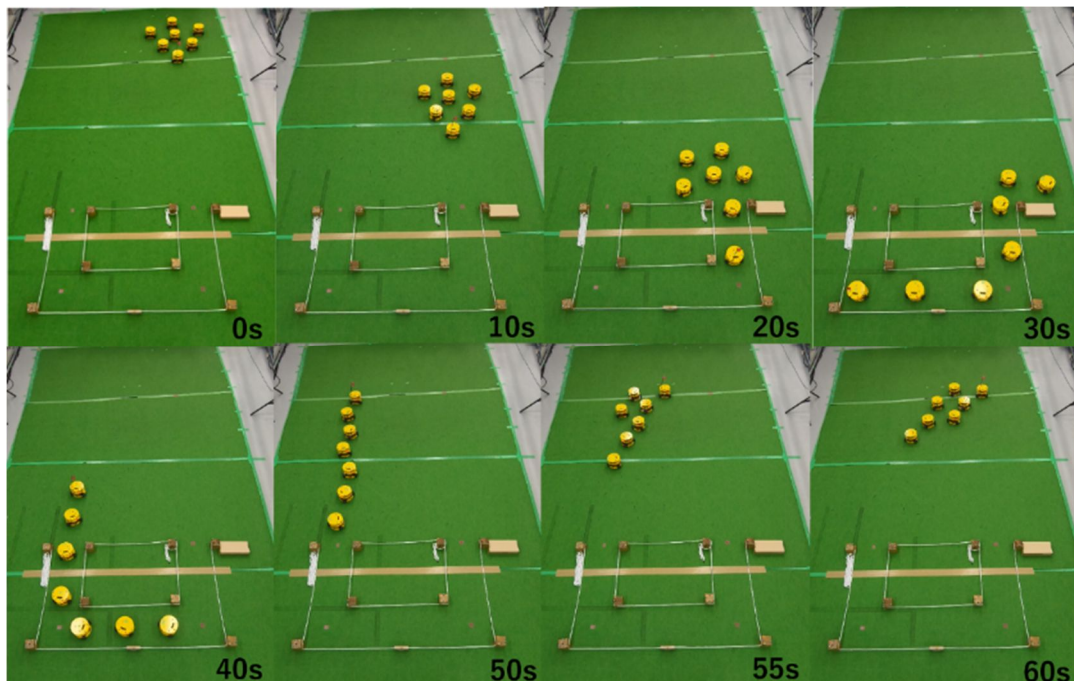


図 1：7 台の陸上ロボットによる実験

(2) UAV 群に適用可能な 3 次元空間でのアルゴリズムの提案

数値シミュレーション、および 3 台のクアドロータに提案法を実現し、検証を行った（下図参照）。ただし、上記 3 でも記載したように、3 次元空間のアルゴリズムにおけるデッドロック回避や低速移動の問題の解決には未だ着手しておらず、今後の課題である。

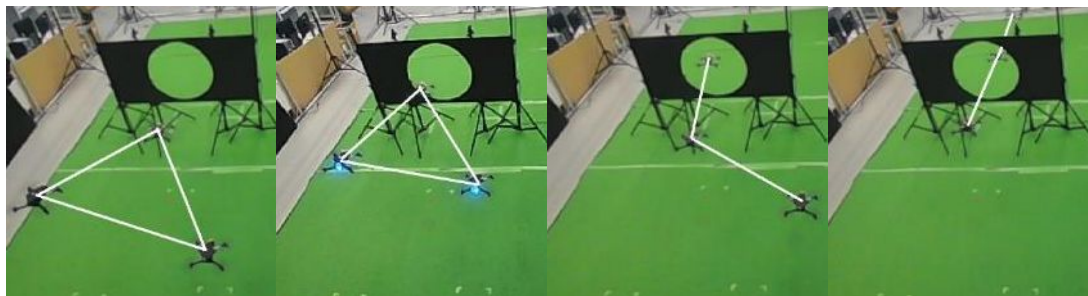


図 2：3 台のクアドロータによる実験（左から 0, 50, 100, 180 sec）

[1] M. M. Zavlanos, M. B. Egerstedt, and G. J. Papas: Graph-Theoretic Connectivity Control of Mobile Robot Networks, Proceedings of the IEEE, 2011.

[2] P. R. Giordano, A. Franchi, C. Seccos, and H. H. Bulthoff: A Passivity-based Decentralized Strategy for Generalized Connectivity Maintenance, International Journal of Robotics Research, 2013.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Daito Sakai, Hiroaki Fukushima, Fumitoshi Matsuno	4. 巻 26
2. 論文標題 Leader-Follower Navigation in Obstacle Environments While Preserving Connectivity Without Data Transmission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 1233-1248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCST.2017.2705121	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 野村祐裕, 福島宏明, 松野文俊
2. 発表標題 3次元障害物環境における連結グラフ構造を維持したロボット群の制御
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅正人, 福島宏明, 松野文俊
2. 発表標題 障害物環境における連結性の維持とデッドロック回避のためのロボット群の移動制御
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Nomura, Hiroaki Fukushima, and Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Navigation of Multiple UAVs in 3D Obstacle Environments While Preserving Connectivity Without Data Transmission
3. 学会等名 The 2021 IEEE Conference on Control Technology and Applications (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
---------	---------