

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560546

研究課題名(和文) 隊形の抽象化と配置の最適化に基づく複数ロボットの制御系設計

研究課題名(英文) Control of a Group of Mobile Robots Based on Formation Abstraction and Decentralized Locational Optimization

研究代表者

福島 宏明 (Fukushima, Hiroaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：40377015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：障害物の多い環境においてロボット群を目標地点へ移動させることを目的として、与えられた軌道に対して指定された幅を持つ経路を追従するようにロボット群の形状を自動的に変形させる制御手法を提案した。ロボット群の形状は屈曲可能な多リンク構造によって作られる多角形領域とし、先頭位置が通った安全な軌道に後続リンクが追従するように関節角を制御することにより、障害物との衝突を回避する。また、多角形領域内ではロボット間の衝突が起き難い配置に分散的に制御する手法を導入した。提案手法によるロボットの配置の最適性に関する考察を行い、シミュレーションおよび実機実験により有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a method of controlling a group of mobile robots based on formation abstraction. The shape of a formation is represented by a deformable polygon to go through narrow spaces without colliding with obstacles. If the trajectory of the front end point, the formation automatically reshapes itself to fit the area through which the front part of the group has already safely passed. Further, the robots continuously try to optimize their positions to decrease the risk of collisions by integrating a decentralized locational optimization algorithm into the formation control. We showed that the objective function does not decrease for fixed and nonconvex polygonal formation shapes if the zero-order hold control is applied for a sufficiently short sampling period. We also analyzed the influence of the locational optimization algorithm on the objective function in the case of variable formations. The effectiveness of the proposed method was demonstrated 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必要性が指摘され、フォーメーション制御に関する研究も多数報告されていた。Beltaらは集団全体の重心の位置、姿勢、形状(長方形または楕円)を特徴付ける抽象変数を導入し、これらの変数を目標値に制御する手法を提案した。導入される抽象変数は、ロボットの台数に無関係であるため、ロボットの台数が増加しても構造の複雑さを抑えることができる。また、Houら(2012)は、抽象変数を制御するだけでなく、ロボット同士の衝突回避にも取り組んでいる。ところが、これらの手法では集団の位置の偏りを考慮していないため、ロボット同士の距離が近い配置に収束する機会が多い。また、集団の形状が長方形または楕円に限定されているために、道幅の狭い環境において旋回しながら移動することが困難である。一方、静的な凸多角形領域に複数ロボットを最適配置する制御手法が従来より提案されており、Cortesら(2005)は各ロボットを各Voronoi領域の内点、すなわち各Voronoi領域に収まり得る最大の円の中心に収束させることで、境界や各ロボットとの距離を最大化する手法が提案している。この手法により、ロボット同士の衝突が起こりにくい配置を実現することはできるが、環境が動的な場合や、凸多角形以外の場合に対応できないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

障害物の多い環境において、移動ロボットの集団を目標地点へ移動させることを目的として、オペレータ等によって与えられた軌道に対して指定された幅を持つ経路を追従するようにロボット群の形状を自動的に変形させる制御手法を提案する。また、提案手法によるロボットの配置の最適性に関する考察を行い、シミュレーションおよび、二輪移動ロボットを用いて実機実験により有効性を示す。

### 3. 研究の方法

従来の長方形領域ではなく、屈曲可能な多リンク構造によって作られる多角形領域を新たに導入した(図1)。先頭位置が通った安全な軌道に後続リンクが追従するように関節角を制御することにより、障害物との衝突を回避する。また、非凸多角形領域でも最適配置となるよう各ロボットを分散的に制御する手法も導入することにより、多角形領域内でロボット間の衝突が起き難い配置に制御する。これを実現するために、多角形領域までの距離、およびロボット間距離の最小値を目的関数として設定した。ロボットの配置の最適性について議論するために、提案する分散制御手法が目的関数に与える影響について数学的に考察した。目的関数が一般に微分可能でないため、目的関数の解析には一般化グラディエントを用いた。さらに提案手

法の有効性検証のため、数値計算ソフトによるシミュレーションに加え、市販の移動ロボットプラットフォームを用いた実機実験を行った。

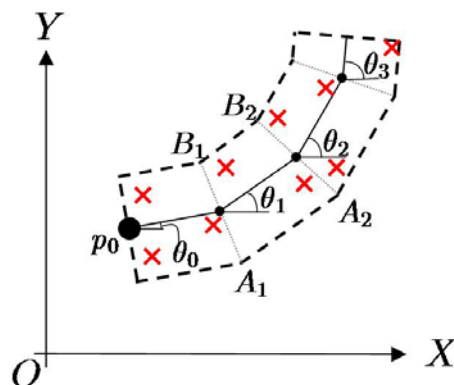


図1 Polygonal shape of formation

### 4. 研究成果

#### (1) 目的関数に及ぼす影響の数学的解析

まず、ロボット群の目標形状が固定された非凸多角形の場合に、一般的に用いられるゼロ次ホールドを用いて制御系を実装した場合に、目的関数が十分短いサンプリングタイムに対して非減少関数であることを示した。目標形状が時間とともに変化する場合には、一般に目的関数が増加することは避けられないため、ロボットの配置手法がない場合よりも目的関数の値が小さくならないことを示した。

#### (2) 計算機シミュレーション

図2の破線のような非凸多角形領域に対し、ゼロ次ホールドを用いて提案する配置手法を10台のロボットに適用した。

無作為に生成した100種類のロボットの初期位置に対して目的関数の減少量を調べた。図3に最も減少量が多かった初期位置に対する目的関数の時間応答を示す。数学的な解析のようにサンプリング周期が  $T=0.01$  の場合、目的関数がほぼ非減少となっている。なお、各ステップにおける目的関数の最大減少値は、 $T=0.1$  の場合に  $5.0 \times 10^{-3}$ 、 $T=0.01$  の場合に  $5.0 \times 10^{-4}$  であった。サンプリング周期  $T=0.1$  の場合には減少している時刻も見られるものの、最終的に  $T=0.01$  と同等の値まで目的関数が増加しているのがわかる。図2に  $T=0.1$  の場合の初期位置(上)と最終位置(下)を示す。図中の×は各ロボットの位置を表している。また、各ロボットの位置を中心として描かれている円の半径の最小値が目的関数の値に対応している。初期位置と比較して最終位置ではロボットが多角形領域内で均等に配置されており、目的関数も大きな値になっているのがわかる。

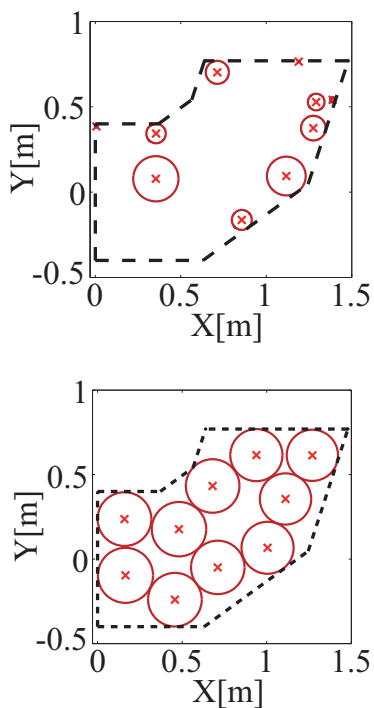


図2 Initial and final robot positions.

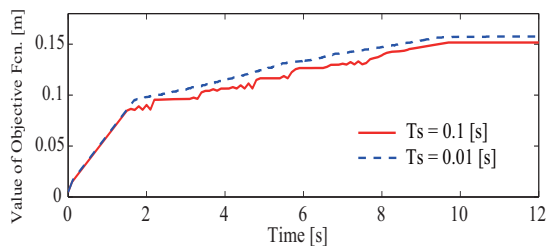


図3 Time response of objective function.

つぎに、目標形状が時間とともに変化する場合のシミュレーションも行った。図4にロボット群が狭い曲がり角において旋回する場合のロボットの配置の例を示す。図5の上図は初期時刻におけるロボットの配置、下図は $t=60\text{s}$ におけるロボットの配置を表している。また、図5に目的関数の値を示した。これらの結果より、提案する配置手法がない場合（破線）と比較して目的関数が大きな値に維持されていることがわかる。

さらに、ロボット群の目標形状を $4.0\text{m} \times 4.0\text{m}$ の正方形から $8.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ の縦長の長方形に変化させた場合の目的関数の値を図6に示す。この場合においても、提案する配置手法がない場合（破線）と比較して目的関数が大きな値に維持されていることがわかる。

### (3) 実機実験

8台の移動ロボットを用いて、ロボット群の目標形状を $1.6\text{m} \times 2.0\text{m}$ の横長の長方形から $3.2\text{m} \times 1.0\text{m}$ の縦長の長方形に変化させる実験、および縦長のロボット群がL字型の経路を通り抜ける実験を行った。実験では図7に示す左右独立駆動二輪車両の“beego”

(TechnoCraft 社製) を用いた。

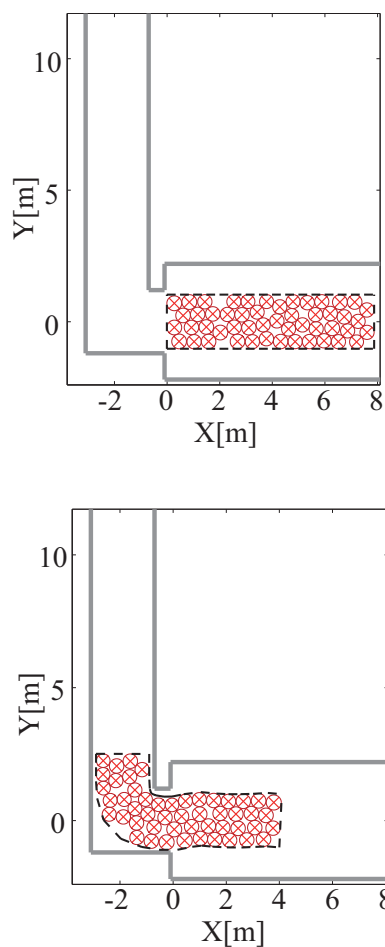


図4 Formation in a corner at  $t=0$  and  $t=60$

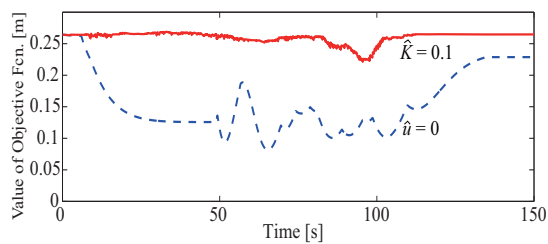


図5 Value of objective function in the case of a L-shaped corner

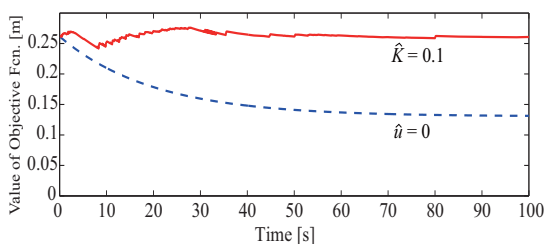


図6 Value of objective function in the case of variable rectangular formation

%

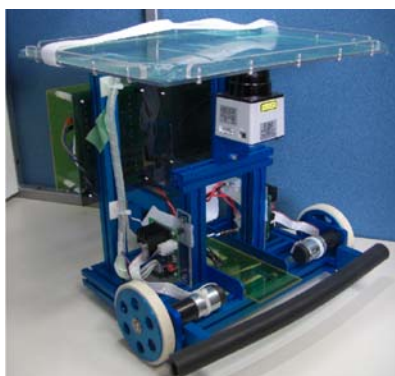


図7 Vehicle for experiment

それぞれの実験における目的関数の値を図8, 図9に示す. ロボット群の形状の変化にも関わらず, 目的関数の値が大きな値に維持されていることがわかる. なお, 各ステップにおける目的関数の最大減少値は図8においては  $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}$ , 図9においては  $1.4 \times 10^{-2} \text{ m}$  であった.

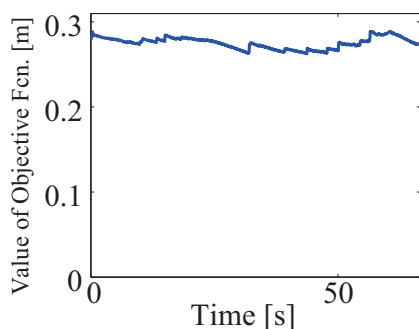


図8 Value of objective function in the case of variable rectangular formation

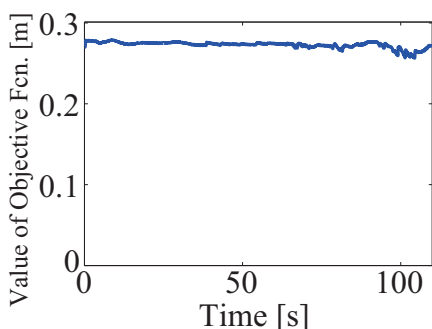


図9 Value of objective function in the case of a L-shaped corner

#### (4) ネットワークの連結性を維持する分散制御手法

上記で提案した方法は, ロボット群の操縦者が群れの幅を指定する必要がある. また, ロボット群の形状や位置・姿勢の情報は各ロボットにブロードキャストする必要がある. このような問題を解決する方法について検

討を行った. この方法においては, 群れの目標経路が1台のロボットのみ与えられ, 他のロボットはネットワークの連結性を維持するように移動することにより, 群れから取り残されることなく移動することが可能である.

#### 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 3件)

- ① H. Fukushima, K. Kon, and F. Matsuno: Model Predictive Formation Control Using Branch-and-Bound Compatible With Collision Avoidance Problems, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 29, No. 5, pp. 1308-1317, 2013, 査読有り. DOI: 10.1109/TR0.2013.2262751
- ② K. Yoshida, H. Fukushima, K. Kon, F. Matsuno: Control of a Group of Mobile Robots Based on Formation Abstraction and Decentralized Locational Optimization, IEEE Transactions on Robotics Vol. 30, No. 3, pp. 550-565, 2014, 査読有り. DOI: 10.1109/TR0.2013.2293836
- ③ 坂井大斗, 福島宏明, 松野文俊: 近傍のロボットと障害物の識別を必要としない移動ロボット群の制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 8, pp. 787-794, 2013, 査読有り. DOI: <http://doi.org/10.9746/sicetr.49.787>

[学会発表] (計 3件)

- ① K. Kon, S. Habasaki, H. Fukushima and F. Matsuno, Model predictive based multi-vehicle formation control with collision avoidance and localization uncertainty, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 517-522, 2012/12/16, Fukuoka, Japan.
- ② 根和幸, 幅崎昌平, 福島宏明, 松野文俊, 衝突回避と自己位置推定の不確かさを考慮した複数移動体のモデル予測編隊制御, 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月17日.
- ③ 小林裕介, 吉本昌弘, 根和幸, 福島宏明, 松野文俊, 複数の移動ロボット群のすれ違いを考慮した編隊制御, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'14), 2014年5月22日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

福島 宏明 (FUKUSHIMA HIROAKI)  
 京都大学・大学院工学研究科・講師  
 研究者番号: 40377015  
 研究者番号:

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :