

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06137

研究課題名(和文) ネットワーク構造の連結性と柔軟性をもつロボット群の制御系設計

研究課題名(英文) Control Design of Multi-Robot Systems Considering Connectivity and Flexibility of Network Topology

研究代表者

福島 宏明 (Fukushima, Hiroaki)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：40377015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、周囲の環境にあわせてロボット群が群れの形を変え、一部が分離することなく目標地点まで到達させる制御手法の確立に向けて、以下の研究を実施した。(i) 操作者が1台のロボットに目標経路を与えると、ロボット群が通信による情報交換を行うことなく、ネットワーク構造の連結性を維持する手法、さらに周囲の障害物にあわせて群れの形を変え、狭隘な環境でも目標経路に追従する分散的な制御手法の構築。(ii) ロボット群が物体の周囲を取り囲み、ネットワーク構造の連結性を維持しながら群れの形を変え、ることにより、効率的に物体を運搬し、目標経路に追従する手法の構築。(iii) 移動ロボットへの実装と実験検証。

研究成果の概要(英文)：The contributions made in this project are summarized as follows. (i) We proposed a navigation method for a group of robots to follow a given target path while preserving the connectivity of the sensing network without data transmission through wireless communication. (ii) We also proposed a cooperative object transportation method for a group of robots while preserving the connectivity of the sensing network and reshaping the formation for effective transportation, without data transmission through wireless communication. (iii) Experimental validation of the effectiveness of the proposed methods.

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・必要性は、極限環境の探査や監視、大きな物体の搬送、環境地図の作成などの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。Yoshidaらはこれを達成するため、ロボット群の目標形状を多角形領域で表現し、各ロボットを与えられた多角形領域内に均一に配置しながら群を移動させる手法を提案した(Yoshidaら 2014)。この手法では、操作員が多角形領域の先頭速度と幅を与えると、多角形領域は障害物との衝突を防ぐため、先頭の通った経路に追従するように自動的に変形する。ところが、多角形領域の情報は全ロボットに送信が必要であるといった問題点が残されている。

一方、ロボット群のネットワーク構造をグラフで表し、グラフの連結性を維持するように移動させる方法が提案されている(例えばZavlanosら 2011, Giordanoら 2013)。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計測・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から分裂することはない。ところが、従来研究のほとんどは障害物を考慮していない。Giordanoらは障害物を考慮した手法が提案されているが、連結性の維持や衝突回避についての理論的な解析はなされていない。また、Giordanoらの方法も含め、多くの方法においては、各ロボットは近隣のロボット、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。

以上の背景から、操作者が1台のロボットに目標経路を与えると、他のロボットは通信による情報交換を行うことなく、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

1台のロボット(リーダー)に目標軌道を与えれば、他のロボットがリーダーが与えられた目標経路に追従、ロボット間の衝突回避、障害物との衝突回避、連結性の維持を達

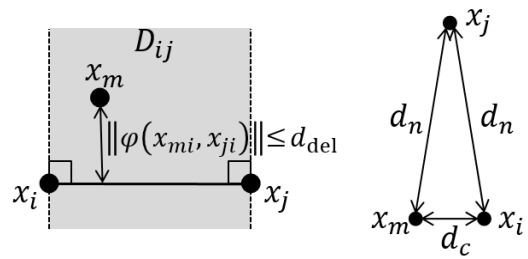


図1: リンク解除の条件

成するように各ロボットの速度を決定する制御則を導出する。

#### (2) 連結性を維持するロボット群の協調運搬制御手法

ロボット群が物体を協調的に押すことによって運搬しながら与えられた目標経路に追従させる問題を取り上げる。(1)と同様に操作員は1台のリーダーロボットのみを操作し、無線通信によるロボット間の情報交換を行うことができない環境を考える。問題の性質上、ロボットや物体と接触する必要があるため、衝突回避は行わない。また、物体はロボットよりも高く、各ロボットは物体の反対側は計測できない状況を想定する。このような場合に適した運搬方法として、ロボット群が物体の周囲を取り囲み、ロボット間の連結を維持しながらリーダーに追従する分散的なアルゴリズムを構築する。

### 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

各ロボットは一定の半径の円内の物体との相対位置を測定できるセンサーを搭載しており、全方向移動が可能であると仮定する。ただし、ロボット間の視線(Line-of-sight: LOS)が障害物に遮られる場合にはお互いの位置を計測することはできない。各ロボットはこのセンサーによる位置情報の取得以外に明示的な通信は行わないものとする。ロボットはセンサーにより個体を識別できない、すなわち計測したロボットがリーダーであるかフォロワであるかは識別できないが、計測した物体がロボットであるか、障害物であるかは識別できるものとする。各ロボットをノードとし、互いに影響を及ぼしあうロボット間にリンクが存在すると考えることで、ロボット群のネットワーク構造をグラフで表現する。以上の設定のもとで、「2. 研究の目的」で記載した ~ を達成するための制御アルゴリズムを決定する。具体的には、サンプリング周期ごとに、次の3段階でロボットの色を決定した。

Step 0: ネットワーク構造を切り替え、すなわち、各ロボットがどのリンクを維持するかを決定する。障害物が存在する環境中を移動する際、例えば障害物周辺ではロボット間のリンクが少なく集団の形状が変化しやすい方が望ましく、障害物が周囲に無い場合に

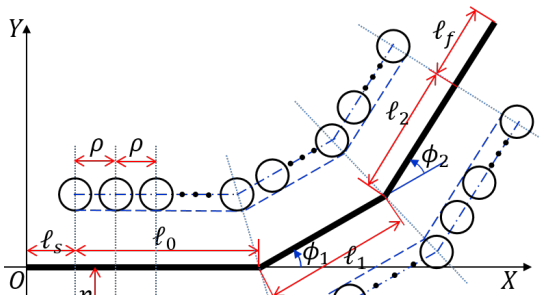


図2: シミュレーションにおける障害物環境

はフォロワがリーダーの周辺に凝集している方が望ましい．とくに難しいのがリンクの解除である．リンクを維持している3台のロボットはお互いのLOSを維持しようとするため、道幅の狭い経路に入る際には、ロボットが描く三角形が長細くなる．通常、図1に示されるような形状になるため、この形状になった場合に所定のリンクを解除する．ただし、図中の  $x_i$  は  $i$  番目のロボットの位置、 $d_n, d_c$  はそれぞれロボット間の最大、および最小許容距離である．

Step 1: 衝突回避とリンクの維持を考慮した人工ポテンシャルを構成し、ロボットの速度方向を決定する．

Step 2: 衝突回避とリンクの維持を保証する速度の大きさを決定する

さらに、上記のように決定された制御手法の有効性をシミュレーションと実機実験により検証した．

## (2) 連結性を維持するロボット群の協調運搬制御手法

従来の協調運搬と異なり、物体の運搬経路の情報は1台のリーダーロボットのみにはしか与えられていない、ロボット間の通信による情報交換を行わない、ロボットは物体の反対側を観測することができない、という状況のもとで運搬を行う必要がある．したがってロボット群が物体の周囲を取り囲み、ロボット間の連結を維持しながら、物体の前方に位置するリーダーに追従することにより運搬を行う方法を考えた．これを実現するため、「運搬する物体への接近」「物体の取り囲み」「運搬」の3つのモードから構成される制御アルゴリズムを構築した．

「運搬する物体への接近」については上記(1)のアルゴリズムから大きな変更の必要はない．操作員により操作されるリーダーロボットが物体に接近すると、一部のロボットが物体を認識し始める．物体を認識したロボットの人工ポテンシャル場には連結性の維持に加えて物体に接近するような項を加える．これにより物体の周囲に到達したロボットは「物体の取り囲み」のアルゴリズムに移行する．「物体の取り囲み」のアルゴリズムは分散配置最適化に基づいて構築した．物体の周囲に到達したロボットは最近傍のロボット

と離れる方向に物体の周囲を移動する．この

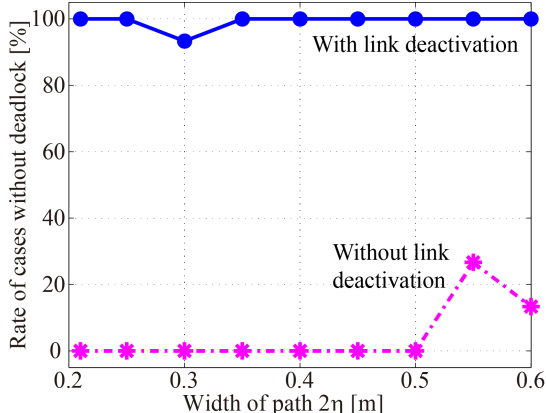


図3: 経路が直線の場合

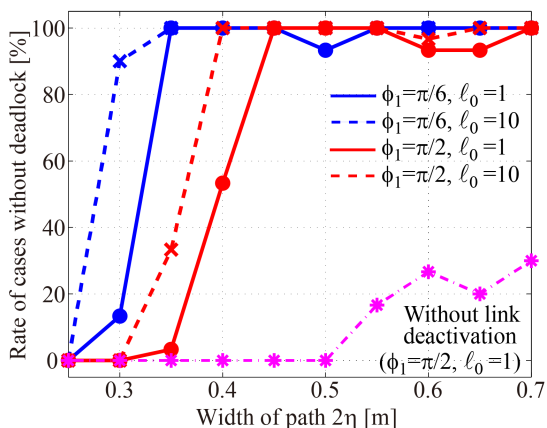


図4: 経路のコーナーが30, 90度の場合

ようなアルゴリズムは物体の周囲にいるロボット間の距離を一定値に収束させる効果がある．各ロボットは自らが一定の位置に収束したことを検知した後、リーダー以外のロボットは、物体を挟んでリーダーの反対側から物体を押し役割のもと、それらのロボットに

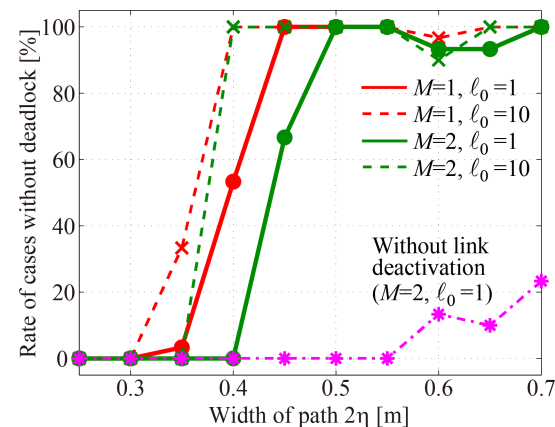


図5: 経路のコーナーが1個と2個の場合

リーダーの動きを伝達する役割のものに自律分散的に分かれる．この場合、物体を押しロボットの数が少なければ物体が動かないため、ロボット群はデッドロック状態に陥る．したがって、効率的に運搬を行うためには、群全体の連結性を維持するという制約のもの

とで多くのロボットがリーダーの進行方向の反対側に集まる。「物体の取り囲み」が終了すると、「運搬」モードに移行し、ロボットはネットワークの連結性を維持しながらリーダーに追従することにより、物体の運搬を行う。以上を考慮した協調運搬アルゴリズムを提案し、シミュレーションと実機実験により有効性を検証した。

#### 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

図2のような障害物環境でシミュレーションを行った。目標経路が太い実線であり、 $d_i$  は目標経路から円形障害物までの距離、 $r_o$  は円形障害物の中心間の距離、 $r_p$  は円形障害物の半径を表す。さらに、 $l_s$  と  $l_f$  はそれぞれ障害物エリアの外側の経路の長さ、 $l_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ) は障害物エリア内の経路の線分の長さである。まず、図3は目標経路が直線

の場合( $M=0$ )のシミュレーション結果の例である。横軸は道幅、縦軸は30種類の初期位置に対してロボット群が障害物環境を通り抜けた割合を示している。この結果より提案したリンク解除ルールを導入したことにより、障害物を通り抜ける割合が向上していることがわかる。図3はコーナーが1個でその角度が30度と90度の場合の結果を表している。また、図4はコーナーが1個と2個の場合の結果を示している。さらに、図6はスナップショットの例を示している( $k$ は時間ステップを表す)。図4,5からコーナーの角度や数とともに障害物環境を通り抜ける

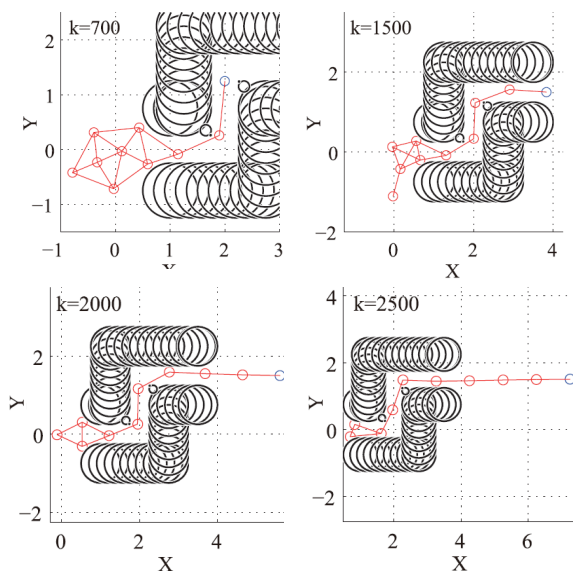


図6: シミュレーションのスナップショット

れない場合が増えていることがわかる。とくに、 $l_0=10$  の場合には最初のコーナーまでの直線が長いので、直線経路の場合の図3と同様にリンクが効果的に解除され、ロボット群は十分に細長い形状になっているにもかか

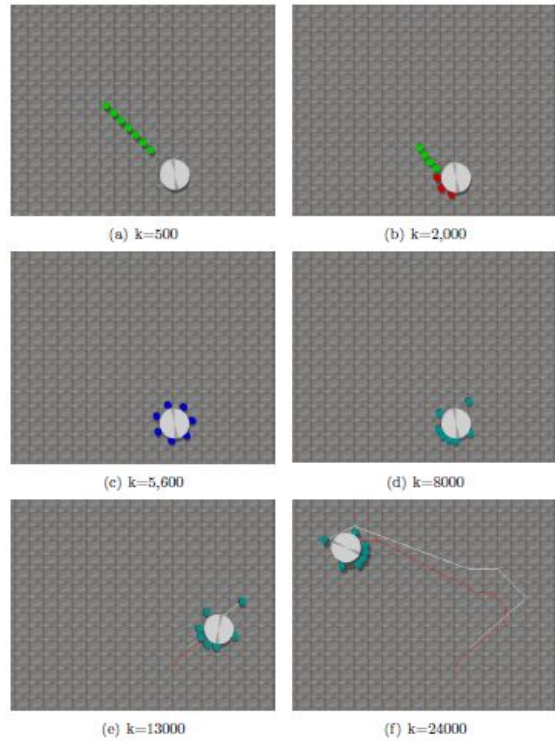


図7: 協調運搬のシミュレーション

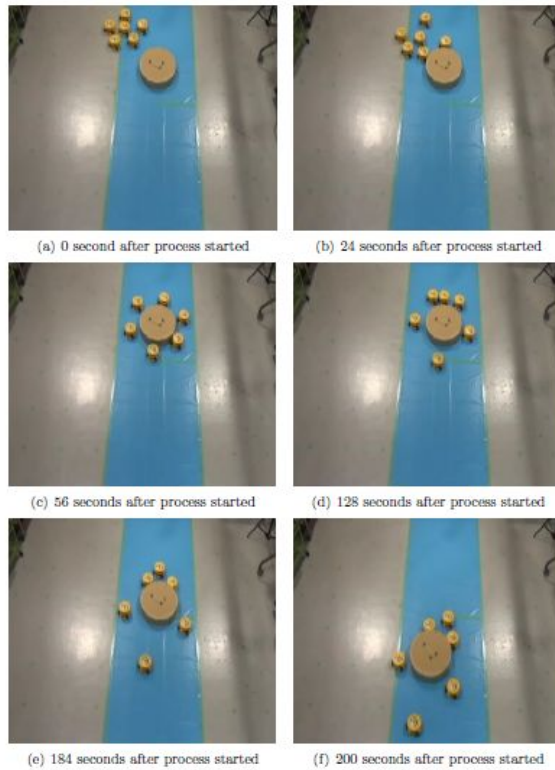


図8: 協調運搬実験のスナップショット

わらず、上記 Step 1 の進行方向の決定が適切でないために、コーナーでロボット群がスタックして動かなくなる傾向が確認できた。この問題に取り組むことは今後の課題である。

##### (2) 連結性を維持するロボット群の協調運搬制御手法

提案した手法を7台のロボットに適用したシミュレーションのスナップショットを図7に示す。黄緑のロボットは「接近」モード、赤は「取り囲み」モードのロボットを表す。k=5600のように等間隔の配置になった後、k=8000以降で運搬に適した配置に移動して、運搬を行っている。また、6台のロボットに適用した実験のスナップショットを図7に示す。いずれの場合も協調運搬を達成できている。ただし、提案手法は、物体を円形に限定している、物体に対して台数が増えると一部のロボットが運搬を行わない、などの問題が残されている。さらに、各ロボットに対してモード切替が確実に達成されるかなどに関する理論的な解析が今後の課題である。

(2)研究分担者 ( )

研究者番号:

(3)連携研究者 ( )

研究者番号:

(4)研究協力者 ( )

## 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 2件)

D. Sakai, H. Fukushima, and F. Matsuno: Leader-Follower Navigation in Obstacle Environments While Preserving Connectivity Without Data Transmission, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 26, No. 4, pp. 1233-1248, 査読有り. DOI: 10.1109/TCST.2017.2705121

D. Sakai, H. Fukushima, and F. Matsuno: Flocking for Multirobots Without Distinguishing Robots and Obstacles, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 25, No. 3, pp. 1019 - 1027, 査読有り. DOI: 10.1109/TCST.2016.2581148

[学会発表](計 2件)

B-H. Kim, H. Fukushima, and F. Matsuno: Cooperative Transportation of a Disk Object by Multiple Robots without Communication, Proceedings of International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, pp. 94-95, 2015.

Y. Kobayashi, M. Yoshimoto, K. Kon, H. Fukushima, F. Matsuno, T. Morii, M. Kitagawa, S. Tsuji, K. Yoshikawa: Formation Control Considering Well-organized Crossing of Robot Swarms, Proceedings of International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, pp. 465-466, 2015.

## 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