

# 自律移動ロボット群を用いたフレキシブル通信ネットワーク構成方法

代表研究者 源 田 浩 一 日本大学 工学部 教授

## 概要

複数の自律移動ロボットが「群」として協調動作する自律移動ロボット群の活用として、火災現場等で発生したイベント（ターゲット）と保守者のいるベースステーション（BS）を接続するフレキシブルな通信ネットワークの構築がある。本研究では、フレキシブル通信ネットワーク構築方法として、ターゲットと BS を接続する 1 : 1 通信路構築の成功率向上方法と、複数ターゲットと BS を接続する 1 : n ネットワーク構築方法を提案した。先行研究の「移動ターゲット技術」を基本に、自律移動ロボットの「停止条件」のチューニングにより成功率を向上できることをシミュレーション評価により明らかにした。また、障害物によりロボットの移動可能領域が制限される環境において自律移動ロボット群がネットワークを自律的に構築する方法を提案し、基本動作の実現をシミュレーション評価で確認した。さらに、1 : n ネットワーク構築方法について、自律移動ロボット群が分岐型ネットワークを自律的に構成する方法を提案し、基本動作及びネットワーク構築率の向上や移動ステップ数の削減による特性の向上を明らかにした。

## 1 はじめに

巨大な倉庫や配送センターにおける荷物の自動搬送作業等、無線通信機能を備えた自律移動可能なロボット（自律移動ロボット）の活用が活発化しており、これからも先進的な AI 搭載等により利用が拡大することが想定される。これとあわせて、複数の自律移動ロボットが「群」として協調して動作する「自律移動ロボット群」の活用が、探索・救助、環境モニタリング、惑星探索等、様々な領域で期待されている。

本研究では、「自律移動ロボット群」の活用として、フレキシブルなマルチホップネットワークの構築に着目する。例えば、電波環境が不安定な火災現場や省人化された物流倉庫で発生した事故等のイベントに対し、保守者がイベント発生場所（ターゲット）から少し離れた安全なベースステーション（BS）からリアルタイムに状況把握や応急対処を行うために、自律移動ロボット群を利用して一時的にフレキシブルなマルチホップネットワークをターゲットと BS 間に自律的に構成する等の利用が考えられる（図 1）。

これまで先行研究 [1,2]にて自律移動ロボット群が1つのターゲットとBS間に自律的に1 : 1 マルチホップ通信路を構成する方法を提案している。本研究では、先行研究を発展させ、1 : 1 通信路構成の成功率の向上と、複数のイベントが異なる場所で同時に発生する環境（マルチターゲット環境）にも適用するための1 : n マルチホップネットワーク構成方法を検討した。

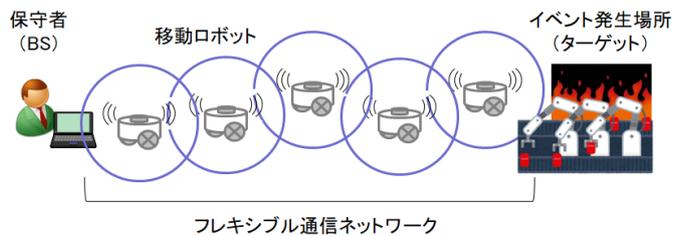


図 1 自律移動ロボット群によるマルチホップネットワーク。

## 2 先行研究

図 2 は、先行研究で提案した 1 : 1 マルチホップ通信路構成のイメージである [1, 2]。自律移動ロボット群の各ロボットは、particle swarm optimization (PSO) [3]に 2 つの目標地点 (gtarget と ptarget) を導入した「移動ターゲット技術」を用いて自律して移動し、ターゲットから BS に向けて徐々に通信路を構築する。ここで gtarget は自律移動ロボット群が目指す目標地点、ptarget はロボットそれぞれが目指す目標地点であり、どちらもダイナミックに適切な地点に更新される。図において、黒丸#j は適切な位置に停止したロボット、ロボット周辺の円は通信範囲、グレーの円#j はロボット#j が更新した gtarget である。gtarget の初

期値 ( $gtarget_0$ ) はターゲットである。ロボットは、1 ステップ移動の度に「停止条件」を判断する。「停止条件」を満足するとき移動を停止し位置確定する。加えて、 $gtarget$  を BS 側に更新する。 $gtarget$  は、ターゲットと BS を結ぶ直線と位置確定したロボットの通信半径との交点に設定される。これをロボット群が BS と接続するまで繰り返すことで通信路を構成する。

本方法を用いることで、1 : 1 通信路を高い成功率で構成できることをシミュレーションにより確認した。しかし、通信路構成の成功率 (通信路構築率) の更なる改善方法や、障害物の存在やマルチターゲット環境における通信路の構築方法は今後の課題であった。

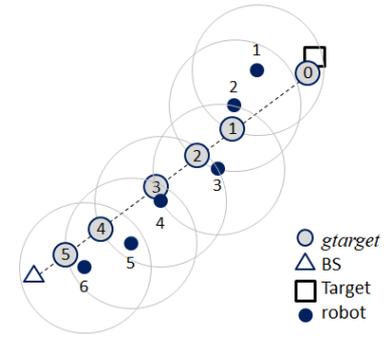


図2 自律移動ロボット群によるマルチホップ通信路例[2].

### 3 本研究内容

#### 3-1 1 : 1 通信路構成の成功率向上

通信路構築率をさらに改善するために、ロボットの「停止条件」と通信路構築率との関係、及び障害物の存在する環境 (障害物環境) における通信路の構成方法を検討した。

##### (1) ロボット停止条件と成功率との関係

先行研究で示したロボットの「停止条件」を式(1)に示す。 $P_t$  は時点  $t$  のロボット位置、 $P_G$  は直前に停止条件を満足し停止したロボットの位置、 $P_S$  は BS の位置、 $R$  はロボットの通信半径、 $\epsilon$  は移動中のロボットが停止可能な  $gtarget$  からの最大距離である。

$$|p^t - P^G| \leq R \quad (1a)$$

$$|p^t - gtarget^t| \leq \epsilon \quad (1b)$$

$$|p^t - P^S| \leq |P^G - P^S|, \quad (1c)$$

本検討では、 $gtarget$  からの最大許容距離  $\epsilon$  が通信路構築率に及ぼす影響をシミュレーションで評価した。表1は評価条件である。ロボットの初期位置はランダムとし、100パターンを評価した。図3は結果の一例である。 $\epsilon$  をロボットの通信半径  $R$  より小さくすることで、通信路構築率を向上できること、ただし通信路確立までに要する平均ステップ数は増加するためトレードオフの関係にあることを定量的に明らかにした。これは  $\epsilon$  を  $R$  より小さくすることで、自律移動ロボットの停止位置が BS とターゲットを結ぶ直線上に近づくため、少ないロボット数であっても通信路構築率が高められることが主な理由である[2]。

表1 評価条件

Number of robots	5
Maximum velocity	2 [arb. unit per step]
Field size	50 x 50 [arb. unit]
BS position ( $P^S$ )	(10, 10)
Target position ( $P^T$ )	(40, 40)
Communication range of robot ( $R$ )	10 [arb. unit]
Maximum number of moving steps ( $T_{max}$ )	200
PSO parameters	$w = 0.75, c_1 = 1.0, c_2 = 1.0$ $r_1 = [0.0, 1.0], r_2 = [0.0, 1.0]$
Terminate condition on the maximum distance from $gtarget$ ( $\epsilon$ )	2, 5, 10 [arb. unit]

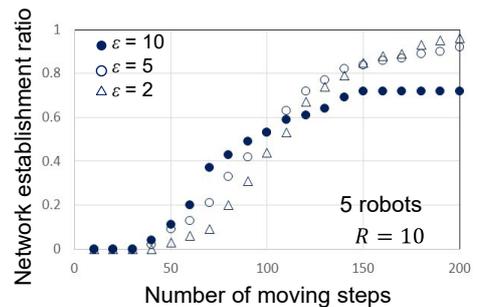


図3 通信路構築率への  $\epsilon$  の影響[2].

##### (2) 障害物環境の通信路構成方法

障害物の存在によりロボットの移動可能領域が制限される環境で BS とターゲットを結ぶ 1 : 1 通信路を構成する方法について、通信路を構築するときに自律移動ロボット群の各ロボットが並ぶ「配置ライン」に着目し、「配置ライン」を自律移動ロボット群が自ら決定する場合と、ロボット群の移動前に保守者が指定する場合の両アプローチから検討した。検討の前提としては、(a) 障害物 (位置、大きさ) は既知とし円形に近似する、(b) 障害物を介したロボット間の通信はロボットの通信半径内かつロボットが障害物外であれば可能とする。なお、本検討は上記を前提とした基本動作を確認したものであり、多様な障害物の形状や障害物の配置等に関する詳細な評価や方法の改善は今後の課題である。

(2-1) 配置ラインを自律決定する場合

「停止条件」を満足したロボットが更新する  $g_{target}$  が障害物の内となる場合は、 $g_{target}$  を障害物の外周に再設定する方法を検討した。シンプルな方法であるが、シミュレーション評価を通して、幾つかの障害物環境（数、位置、大きさ）において通信路を期待通り構成できることを確認した。図4は障害物数が1個から4個存在する環境で自律移動ロボット群が構成した通信路の例である。通信範囲円を表示したロボットが通信路構築のために位置確定したロボットである。障害物を迂回して通信路を構成することが確認できる。

(2-2) 配置ラインを指定する場合

保守者が自律移動ロボット群に移動の指示を行う時に BS とターゲット間の適切な配置ラインをあらかじめ指定し、そのラインに従いロボット群が自律的に移動することで、ロボット数を極力抑えた通信路構成や通信構築率の向上が期待できる。本検討では、BS とターゲット間の配置ライン決定方法としてロボットの動作計画問題等で利用される方法の一つである Rapidly-exploring Random Trees\* (RRT\*) [4]を採用した。RRT\*を用いて障害物を回避した配置ラインが決定出来ること、配置ラインに従い自律移動ロボット群が通信路を構成することを確認した[5]。

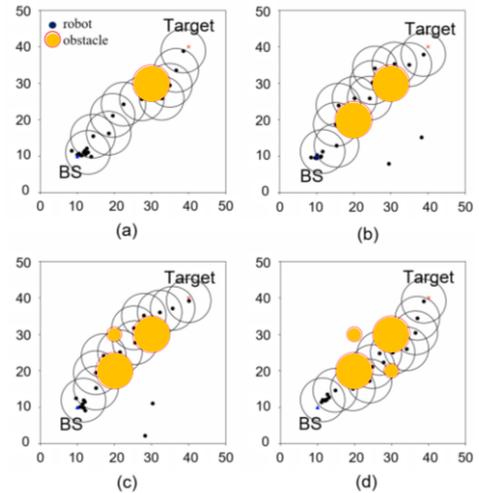


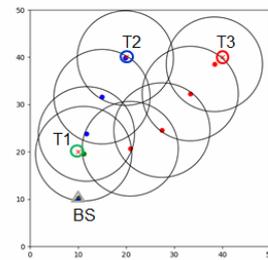
図4 障害物環境下の自律移動ロボット群によるマルチホップ通信路例, (a)障害物1個, (b)2個, (c)3個, (d)4個の場合.

3-2 1 : n ネットワーク構成方法

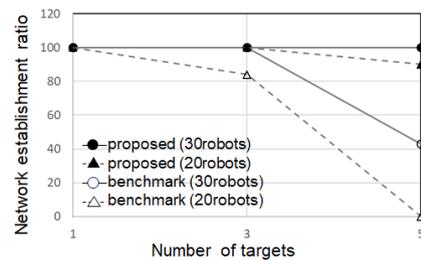
先行研究[1、2]ではターゲットを1か所としたが、現実には複数のイベントが異なる場所で同時に発生することがある(マルチターゲット環境)。そこで、マルチターゲット環境を想定した 1 : n マルチホップネットワーク構成方法を検討した。

自律移動ロボットの数とネットワーク構築に要する移動ステップ数を出来るだけ削減することを目的に、先行研究の「移動ターゲット技術」を基本に、移動ロボットが自律的に 1 : n の分岐型ネットワーク構造をつくり出す方法を明らかにした[6]。主な動作を以降に示す。それぞれの移動ロボットを、特定のターゲットを目指すグループにあらかじめ割り当てる。移動ロボットは、「移動ターゲット技術」に従い、ターゲットから BS に向けてネットワークを自律的に形成する。このとき移動ロボットは同一のグループに属するロボットとのみ情報を交換し移動する。「停止条件」を満足し、属するグループの  $g_{target}$  近傍で停止したロボットは、周辺に他グループに属する既に停止済みのロボットを探索する。存在する場合は、閉路が発生しないことを確認し、そのロボットと接続することで分岐型ネットワークを構成し、属するグループのネットワーク形成を終了する。

提案方法の有効性をネットワーク構成の成功率(ネットワーク構築率)と移動ステップ数の点からシミュレーション評価した。各ターゲットに対し移動ロボット数を均等に割り当てた。ベンチマークとしては各イベント発生場所と BS を 1 : 1 に接続する先行研究の方法とし比較した。図5は(a)ターゲット数3の時に提案方法により構成されたネットワークの一例と(b)ネットワーク構築率である。移動ロボット数は 20/30、 $\epsilon$  は 10[任意単位]である。またターゲットは T1(40, 40)/ T2(10, 20)/ T3(20, 40)/ T4(20,



(a)



(b)

図5 マルチターゲット環境下の自律移動ロボット群によるマルチホップネットワーク例, (a)ネットワーク構成例, (b)ネットワーク構築率[6].

0) / T5 (50, 30)であり、ターゲット数が1の時はT1、3の時はT1/T2/T3、5の時はT1からT5の全てである。他の評価条件は表1と同様である。複数ターゲットのときは全てのターゲットとBSの接続が確立できたときに成功と判断した。ロボットの初期位置はランダムとし、100パターンを評価した結果である。提案方法を用いることで高いネットワーク構築率とでき、特に少ない移動ロボット数のとき提案方法は効果的であることがわかる。また移動ステップ数については、例えばロボット数30、イベント発生数5の場合でネットワーク成功時において40%削減できることを確認した。

#### 4 既存研究

移動ロボット群を用いて通信路を確立する方法が幾つかの検討されている(図6)。文献[7]では、保守者が全ての移動ロボットを集中制御することで、移動ロボットの移動距離や情報伝達に必要とするホップ数を削減する方法を提案している。文献[8]では、自律移動ロボットが、隣接するロボットの位置情報を取得して次の位置を自ら決定し移動することを繰り返しターゲットと保守者間に自律整列した後、AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) アルゴリズムに基づき通信路を形成するアルゴリズムを提案している。また、文献[1, 2]では、PSOアルゴリズムを基本に、自律移動ロボットが隣接するロボットの位置と速度情報を用いて新たな移動を自律的に繰り返すことで、ターゲットと保守者間に通信路を形成しながら整列する方法を提案している。しかしながら、ロボットの自律移動を前提とする既存方法[1, 2, 8]は、通信路を確立できないケースが発生する等の課題がある。また、BSとターゲット間の1:1通信路の確立に限定した検討であり、利用範囲が限定された。

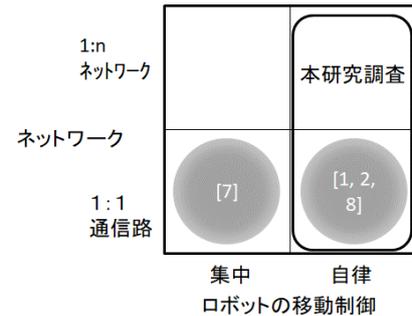


図6 既存研究.

#### 5 おわりに

本研究では、自律移動ロボット群を用いたフレキシブルな通信ネットワークに着目し、1つのターゲット環境を想定した1:1通信路構成の成功率の向上方法と、マルチターゲット環境を想定した1:nネットワーク構成方法を提案した。

成功率の向上については、先行研究で示したロボットの「停止条件」をチューニングすることで成功率を向上できることをシミュレーション評価により明らかにした。また、障害物によりロボットの移動可能領域が制限される環境で自律的なネットワーク構成するために、ロボットの配置ラインをロボット群がすべて自律して決定する方法と、あらかじめ保守者が指定する方法を提示し、基本的な動作が期待通り実現できることをシミュレーション評価で確認した。

1:nネットワーク構成方法については、ロボット群が自律的に分岐型ネットワークを構成する方法を提案し、基本的な動作及びネットワーク構築率の向上や移動ステップ数の削減等の効果を明らかにした。

今後は、様々な実環境の条件を考慮した方法へ発展させ、加えて実端末を用いた動作検証に取り組み、社会実装に向けた技術確立を目指す。

#### 【参考文献】

- [1] 秋元, 源田, “粒子群最適化を用いたロボットネットワークによる自律監視法,” 東北地区若手研究者研究発表会, 2022.
- [2] K. Genda, “Autonomous multi-hop network using PSO-based mobile robot swarm with the moving target technique,” IEEE CCNC, pp.888-891, Jan, 2024.

- [3] J. Kennedy and R. Eberhard, "Particle Swarm Optimization," IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.
- [4] S. Karaman and E. Frazzoli, "Incremental Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning," IEEE Transactions on Robotics, 26(4), pp. 635-646, 2010.
- [5] 川村, 源田, "自律移動ロボット群によるマルチホップネットワーク構成時間の短縮化," 電気関係学会東北支部連合大会, 1E01, 2023.
- [6] 源田, "自律移動ロボット群を用いたマルチターゲット環境下のネットワーク構成方法," 電子情報通信学会総合大会, B-15-44, 2024.
- [7] A. Wichmann, T. Korkmaz, and A. S. Tosun, "Robot control strategies for task allocation with connectivity constraints in wireless sensor and robot networks," IEEE Trans. Mobile Comput., 2018.
- [8] J. Takahashi, K. Sekiyama, and T. Fukuda, "Self-deployment algorithm for mobile sensor network based on connection priority criteria with obstacle avoidance," IEEE ROBIO, 2007.

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Autonomous multi-hop network using PSO-based mobile robot swarm with the moving target technique	IEEE Consumer Communications and Networking Conference	2024年1月
自律移動ロボット群を用いたマルチターゲット環境下のネットワーク構成方法	電子情報通信学会 総合大会	2024年3月
自律移動ロボット群によるマルチホップネットワーク構成時間の短縮化	電気関係学会東北支部連合大会	2023年9月