

## 効率的な地図構築のための群ロボット探索戦略

中園 雄太 巳波 弘佳

関西学院大学 理工学部 〒669-1337 兵庫県三田市学園 2-1

E-mail: {coo08059, miwa}@kwansei.ac.jp

## 1 はじめに

大規模災害時における情報流通手段の確保や、建物内の被災者救出や被災状況に関する情報を効率的に収集・共有する方法の確立は重要な課題である。これに対して、これまで、主にレスキューロボットの研究開発が行われてきた [1]。自律的に探索するロボット実現のためには、未知の環境においてロボットが自己位置推定と地図構築を同時に行わなければならない。このような問題は SLAM (Simultaneously Localization and Mapping) と呼ばれる枠組みで広く研究されている [2]。しかし、被災した建物内における通信環境は劣悪であるため、建物外からの通信による遠隔操作や建物内の長距離通信は困難である。また、劣悪な通信環境を考慮した、複数の救助者・ロボットを用いた効率的な探索戦略に関して、まだ十分な検討がなされていない。

そこで本研究では、建物内のような劣通信環境下において、至近距離間だけの通信が可能な機器を用いた蓄積搬送型通信を用いて、複数のロボットの協調により、効率的に建物内の構造情報を収集する探索アルゴリズム (図 1 参照) を提案することを目的とする。

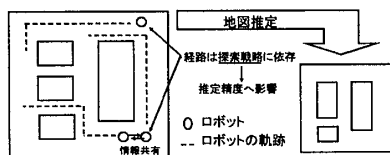


図 1 複数台ロボットによる探索と地図構築.

## 2 群ロボット探索アルゴリズム

## 2.1 モデル

本研究では、蓄積搬送型通信を用いて、複数のロボットが協調することによって建物内の構造情報を収集する探索アルゴリズムを検討する。蓄積搬送型通信とは、劣通信環境下における情報通信技術 DTN (Delay- and Disruption-Tolerant Networking) において有効な通信方式の一つである。移動可能なノードが、至近距離間だけの通信が可能な機器を用い、通信可能な範囲に入った時のみ情報を相互に送受信して蓄積することを繰り返すことにより、情報を伝搬する。

本研究において、各移動ノード (ロボット) は、建物内の構

造を記録・蓄積しながら自律的に移動することが可能とする。移動ノードは蓄積搬送型通信機能を用いて、移動ノード間や移動ノードと外部との通信が可能なノード (ベースステーション, BS) 間において地図情報を共有できるものとする。このような状況の下で、移動ノードが収集・共有した建物構造の情報を BS に短時間で集めることが目的である。

探索対象となる空間は、曲り角や行き止まりを点・廊下を辺と捉えることによって無向グラフとしてモデル化する。シミュレーション時間は離散的とする。

探索アルゴリズムは、各移動ノードの初期位置を定め、時刻ごとに次に探索する辺を決定するか、留まるかの選択を繰り返して探索する。他の移動ノードと遭遇した場合は、各移動ノードが保持する部分グラフを、それぞれが保持していた部分グラフの和に更新することで共有化する。BS に転送されたすべてのグラフの和によって定まるグラフが、推定されたグラフ (グローバルマップ) である。

主な性能評価尺度として、推定されたグラフの総辺数を、全体を表すグラフにおいて探索した点集合によって誘導される生成部分グラフの辺数で割ったもの (合致率) とする。救助計画の立案では、わずかずつでも情報を入手できることが望まれる。よって、少ない移動ノードで、合致率が漸増しつつ短い時間で高い合致率を示す探索アルゴリズムが望ましい。

なお、仮に地図全体が事前に分かっているならば、複数人による中国人郵便配達問題 ( $k$ -CPP)[3] の解が、我々の研究における最適なロボットの探索経路となる。本研究では、地図全体がわからない状況であるため、 $k$ -CPP とは問題設定が異なるが、探索アルゴリズムの性能の比較対象として利用できる。ただし、 $k$ -CPP は NP 困難であるため、最適解を得ることは困難であり、その下限値との比較とならざるをえない。

## 2.2 探索アルゴリズム

探索アルゴリズムは基本的には深さ優先探索に基づく。しかし、単純な深さ優先探索だけでは、移動ノード間での情報共有の効果を考慮できず、BS ヘデータを渡すまでの時間が長い場合、合致率の漸増を実現できない。そのため、本研究では、 $\alpha$  時間ごとに周期的に BS に帰還させるようにする。BS に周期的に戻ることににより、それまでに得られているグローバルマップを受け取ることができるため、既探索領域の探索を回避して未探索領域を探索できるようになり、探索効率の向上が期待できる。また、特定の方向のみに探索が偏らないよう、一度の探索で進む深さ *Depth* を制御した。

アルゴリズム ALG1 は、周期的に BS に戻ることと特定方向への探索集中の回避を重視したものである。これは収集されたデータが漸増する効果があるが、総移動距離が大きくなる傾向がある。一方、アルゴリズム ALG2 は、未探索辺の探

索を優先したものである。αによる周期的な帰還のみのため、BSにデータが集積される効果とグローバルマップ取得による効率向上の可能性は弱まるが、総移動距離の短縮と、移動ノードの遭遇可能性の向上による情報共有効果が見込める。

アルゴリズム (ALG1)

入力: 部分格子グラフ  $G = (V, E)$ , 移動ノード数  $num$ ,  $Depth$ ,  $\alpha$ , 探索時間  $Time$

帰還条件: BS の位置を初認識した時刻から α 時間経過。初回以降は、前回の帰還条件を満たした時刻から α 時間経過。

地図情報の共有: 移動ノード間の通信が発生時に実行。

Step.1 V 上に  $num$  個の各移動ノードの初期位置を決定する。

Step.2 探索実行時間が  $Time$  になるまで以下を実行。

Step.3 現在地を候補点リストに記憶した後で、移動ノードを BS に移動させて Step. 5 へ。帰還条件を満たさない限り Step. 3 は実行されない。

Step.4 基準点 (最初は初期位置) から深さ  $Depth$  まで深さ優先探索を実行する。このとき深さ  $Depth$  の点を候補点リストに記憶する。移動ノードが BS に到着した場合、Step. 5 を実行して Step. 4 を継続する。Step.4 実行中に帰還条件を満たしたら Step. 3 へ。Step.4 が完了したら Step. 6 へ。

Step.5 移動ノードが保持するグラフを BS に渡す。BS はグローバルマップを作成して、移動ノードへ保持させる。

Step.6 候補点の中で、未探索辺の接続数が最大の点へ最短経路に沿って移動ノードを動かす。選択した候補点は候補点リストから除外。移動完了後、基準点を移動先の点に更新して Step. 4 へ。Step. 6 実行中に帰還条件を満たしたら Step. 3 へ。候補点が存在しない場合は、情報共有以外の処理または移動ノード間の情報共有によって認識した点のなかで、未探索辺が最も多く接続している点を候補点とする。

アルゴリズム (ALG2)

アルゴリズム ALG1 において、Step.4 を「点が探索済みであっても、未探索辺が存在する限り出戻らない深さ優先探索を実行する。移動ノードが BS に到着した場合、Step. 5 を実行して Step. 4 を継続する。Step.4 実行中に帰還条件を満たしたら Step. 3 へ、移動不能に陥ったならば Step. 6 へ」としたものである。

なお Step.6 において、BS との通信で確認しただけの点を候補点として処理すると、BS を 2 つ以上設置した場合、現在地から連結ではない点を候補点として選択するといった問題が発生する。また同じ点を候補点として扱う可能性が上昇することで性能悪化を招く。したがって上記のように処理した。

3 性能評価

2500 点の完全格子グラフにおける実験結果を示す。移動ノード 4 台を外周部に等間隔で配置し、BS は移動ノードを配置した位置のいずれか一つに配置した。

図 2 は深さ優先探索 (DFS) と反復深化深さ優先探索 (IDDFS) とアルゴリズム (ALG1) とアルゴリズム (ALG2) の探索性能を比較したものである。DFS の場合、時間経過にしたがって合致率が漸増する性質を持たない。また IDDFS や ALG1 よりも ALG2 の方が優れていることが確認できる。「オイラー路/robot」とは、与えられるグラフが既知であるときに、そのグラフをオイラー補完 (オイラーグラフとなるように最小数の辺を付加) したグラフの総辺数を、移動ノード台数分で割ったものであり、下限値である。探索完了時刻を

下限値で割った値が 1 に近づくほど良い探索アルゴリズムであるが、事前にグラフが与えられていない場合には、1 にはできない。なお、ALG2 では 2.99 である。

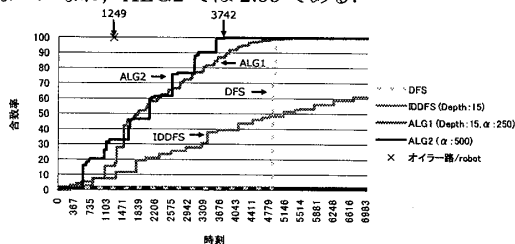


図 2 アルゴリズム間性能比較。

図 3 は、移動ノード同士の情報共有の有無が、アルゴリズムに与える影響を示している。これから、情報共有を導入している方が合致率上昇が速いことが分かる。

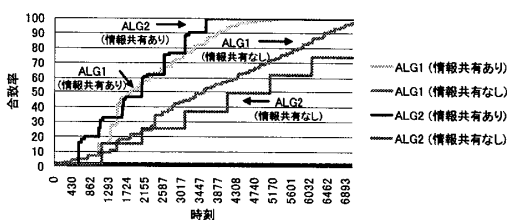


図 3 情報共有有無の影響。

図 4 は、同様の完全格子グラフから点を 15% 欠損させた部分格子グラフにおいて、 $Depth$  と  $\alpha$  が ALG1 の性能に与える影響を示している。実験結果の縦軸は最大合致率を達成した時刻であり、横軸は実験環境である欠損グラフの番号である。パラメータを適切に設定すれば ALG1 も ALG2 も同等の性能を実現できるが、ALG2 はパラメータ数が少なく、より実用的と言える。

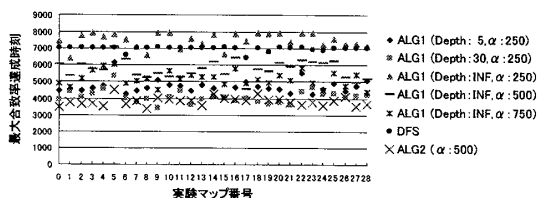


図 4 パラメータによる性能の差異。

4 まとめ

本稿では、劣通信環境下において、群ロボットが未知環境を効率よく探索するための群ロボット探索アルゴリズムの提案とその性能評価を行った。その結果、蓄積搬送型通信とロボット間で情報を共有する協調動作を取り入れて効率化を図ったアルゴリズムの性能は、単純なアルゴリズムの性能を大きく上回ることが分かった。

参考文献

- [1] 田所, “レスキューロボットの現状と未来”, 電子情報通信学会誌, Vol. 92, No. 3, pp. 203-208, Mar., 2009.
- [2] M. Michael, T. Sebastian, “FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem”, Springer, 2007.
- [3] A Osterhues, F. Mariak, “On variants of the  $k$ -Chinese Postman-Problem”, Operations Research and Wirtschaftsinformatik, Aug., 2005.