

# 通信接続性を重視した可動ノードの未知領域協調探索手法

寺田 謙伸<sup>1</sup> 小倉 広大<sup>1</sup> 勝間 亮<sup>1,a)</sup> 山本 眞也<sup>2</sup> 柴田 直樹<sup>3</sup>

概要：本稿では、災害後の屋内環境の様子を調査するために、複数の可動ノードが情報交換をしながら協調して未知領域の各地点を効率良くくまなく訪問する手法を提案する。すべてのノードが常に移動する探索アルゴリズムでは、情報共有ができない可能性があり、同じ領域を複数の可動ノードが訪れる無駄が発生していた。提案手法では、ノードの一部を待機させ、常に他のノードと情報共有ができる領域をできるだけ広く維持することで、探索効率を上げ、短時間で探索を完了させている。本稿のシミュレーション設定においては、すべてのノードが移動する手法に比べて探索時間を平均的に約78%にすることができた。

## 1. はじめに

災害が起きた場合、災害後の屋内の様子を短時間で詳細に知ることができれば、スムーズな救助活動が可能である。そのため、屋内のマップや写真などを救助活動前に準備しておくことが重要であるが、災害時にはネットワークにアクセスできない等、事前に用意していた間取り図を入力できない可能性がある。さらに、屋内環境は壁や天井の崩壊、家具などの倒壊などにより災害前と大きく変化しており、災害前の間取り図などが役に立たないケースもある。よって、救助隊の到着前に自動で下調べを行い、救助隊の活動開始時に屋内環境の詳細を直観的に理解できる3Dビューマップ形式で提示することが求められる。そこで、近年、ナビゲーションを目的として建物内にARマーカを設置する研究に着目し[1][2][3]、可動ノード[4]が建物内のARマーカを目印として協調探索することで短時間で3Dビューマップを作成することができると考えた。

このアイデアをもとに、以前に我々の研究グループでは救助隊到着前や夜間などの救助隊の活動休止中に複数の可動ノードでARマーカが設置されている建物内部を自動探索するための可動ノードの移動方法を提案した[5]。各ノードは定期的に他のノードとの通信を行い、お互いの探索済みエリアの情報を交換することで協調して領域を探索していく。この環境において探索可能なすべてのマーカを1つ以上の可動ノードが訪れ、それを知る可動ノードが探索開

始位置に帰還させることが目的である。しかし、このアルゴリズムには、可動ノード同士が通信範囲内にいなければマップデータの共有ができないことが原因で情報共有がうまく行えず、複数の可動ノードが同一領域を探索してしまう問題がある。また、探索可能なすべてのマーカを1つ以上の可動ノードが訪れたにも関わらず、その情報が探索開始位置に伝わるまでの時間が長く、ノードが無駄な探索を続ける可能性がある。

よって、本稿では、より効率的に屋内探索の情報を共有するために、上記のアルゴリズム[5]に加え、中継協調探索アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、すべてのノードに探索を行わせるのではなく、分岐点や一定間隔毎に可動ノードを待機させるアルゴリズムである。その可動ノードを通信の中継とすることで、より広範囲で探索済み領域の情報を交換し、効率よく領域を探索できる。現実の建物を模した領域を設定したシミュレーションの結果、探索完了までにかかった時間は、すべてのノードが常に移動しながら探索を行う従来の手法は平均233秒、提案手法は平均181秒かかり、通信環境を整えるために一部のノードを待機させておくことで、平均的に22.0%短縮できることを確認した。また直線の領域であれば、平均的に46.7%短縮できることを確認した。

## 2. 問題設定

本章では、本研究の屋内、可動ノード、簡易マップについての環境設定、可動ノードによる探索時間に関する定義式、問題の定式化と解決へのアプローチについて述べる。

<sup>1</sup> 大阪府立大学  
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan  
<sup>2</sup> 山口東京理科大学  
Tokyo University of Science, Yamaguchi, Japan  
<sup>3</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
NAIST, Ikoma, Nara 630-0192, Japan  
a) ryo-k@mi.s.osakafu-u.ac.jp

## 2.1 環境設定

### 2.1.1 屋内の AR マーカ

探索対象の建造物の内部マップは未知の状態でも可動ノードが探索を行う。そこで、ナビゲーション等のためにあらかじめ建物内部に数メートル間隔で設置されている AR マーカを利用する。マーカはビットパターンにより固有のマーカ ID を表現することができ [6]、曲がり角などの情報を付与することもできる。可動ノードはマーカの位置に到着するたびに 3D ビューマップを生成するためにカメラで周囲を撮影する。そのとき、新たに未発見のマーカが撮影できたとき、その存在を認知する。このようにして芋づる式にマーカを次々と発見していくことで通路の分岐の把握を行い、未探索の領域の存在を知ることができる。以降、1つ以上の可動ノードが訪れたマーカを探索済みのマーカ、そうでないマーカを未探索のマーカと呼ぶ。

### 2.1.2 可動ノード

可動ノードは通信機、カメラ、小型 PC、その他ユーザが必要とする情報をセンシングする各種センサを搭載しており、可動ノードには固有の ID 番号が割り振られているとする。各可動ノードは探索領域内にあるベースステーションから探索を開始する。このとき、探索開始位置には移動しないシンクノードが存在し、最終的にシンクノードに探索情報を集約する。可動ノードがマーカ  $v$  からの距離が  $d$  以内に存在するとき、その可動ノードはマーカ  $v$  の位置にあると言う。ただし、複数のマーカからの距離  $d$  以内である地点が存在しないよう  $d$  を定める。可動ノードは自身が初めて到達したマーカの位置から周囲 360 度の撮影を行う。このとき、他のマーカを発見することができる。

### 2.1.3 簡易マップ構築

ここでは、各可動ノードが自身の記憶領域内に作成する屋内マップについて述べる。可動ノードがどの領域を探索すれば良いかの判断を行うためには、発見したマーカの位置関係を把握しておく必要がある。そこで、各可動ノードはマーカを頂点とし、隣接するマーカの間を辺としたグラフにより簡易屋内マップを記録していく。

## 2.2 問題の定式化

対象領域  $F$  内にあるマーカのうち、2.1.3 項で述べたグラフ上で探索開始位置  $v_0$  と連結しているマーカの集合を  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 、可動ノードの集合を  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 、シンクノードを  $s_0$  とする。これらと可動ノードの探索開始位置を本問題の入力として与える。出力は、探索開始時刻  $t_{start}$  から探索終了時刻  $t_{end}$  までのすべての可動ノードの移動スケジュールである。ここで、可動ノード  $s_i$  の移動スケジュールとは、探索終了までに  $s_i$  が訪れるマーカの順列のことであり、以下の式 (1) で表される。

$$s_i.route = \{v_{(s_i,0)}, v_{(s_i,1)}, \dots, v_{(s_i,k)}\} \quad (1)$$

制約条件は、探索終了までに探索可能なすべてのマーカを 1つ以上のノードが訪れ、その情報が  $s_0$  に届けられることである。この制約は式 (2) で表される。

$$\forall s \in S, E(s) = E(s_0) = \emptyset \quad (2)$$

本問題の目的は、探索可能なすべてのマーカを 1つ以上の可動ノードが訪れ、その情報を探索開始位置に伝えるまでの時間  $t_{end} - t_{start}$  をできるだけ短くすることである。

## 3. 提案手法

本章では、2 節で定式化した問題をより早く解決する方法を述べる。

可動ノードは探索開始位置からカメラで認知可能なマーカを発見し、そのうちのどのマーカを訪問するかを未知エリア探索アルゴリズムにより決定する。未知エリア探索アルゴリズムとは、我々が以前に提案したアルゴリズム [5] であり、分岐点でノードを均等に分配する手法である。

これに加え、できるだけ最新の簡易マップを各ノードが共有できるように通信の円滑化を行う。分岐点や一定間隔ごとに可動ノードを待機させ、そのノードを中継として通信することで、より広い範囲で探索済みエリアの情報を交換でき、効率よく領域を探索できる。特に、同じ場所を何度も探索してしまうケースを軽減できる。また、終了条件を満たしたことを探索開始位置まで知らせるまでの時間ロスもなくすることができる。

### 3.1 中継協調探索アルゴリズム

可動ノードの中には探索を行うノードの他に、通路に待機して通信の中継のみを行うノードが存在する（待機ノードと呼ぶ）。探索開始位置に設置してあるノードもしくはいずれかの待機ノードと通信可能な範囲の中で最も速い位置に新たな待機ノードを設置することで、マルチホップ通信により多数のノードが即座に相互通信できる環境を効率よく作ることが、本アルゴリズムのねらいである。

総ノード数を  $N$  とする。探索開始位置に設置してあるノードおよび待機ノードの集合を  $U$  とする。あるノード  $s$  がマーカ  $v_1$  では  $U$  に属するいずれかのノードと通信可能であるとすると、 $s$  が  $v_1$  から  $v_2$  に移動した場合において、 $U$  に属するいずれかのノードとも通信できなくなったとき、次で述べる中継協調探索アルゴリズムを実行する。また、中継協調探索アルゴリズムの (1) で集合  $S$  に属するノードが通知を受けたときも実行する。

(1)  $s$  は  $v_1$  の位置に戻り、周囲の各ノードと 1 ホップ通信を行い、 $v_1$  から距離  $x$  以内に存在するノードを検出し、そのノードのうち  $U$  に属していないノードの集合を  $S$  とし、 $S$  に属するすべてのノードに通知する。以降のステップは、 $S$  に属するノードのうち最もバッテリーが多いノードのみが処理を行う。

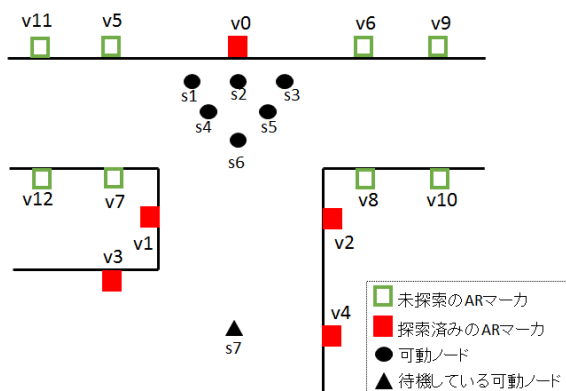


図 1 中継協調探索アルゴリズム開始時の状況

- (2)  $|S| < aN$  ( $a$  はユーザが決定する定数) であれば、待機ノードは設置せずにアルゴリズムを終了する。ただし、 $|S|$  は  $S$  に属するノードの数を意味する。
- (3)  $S$  の中でバッテリー量が  $b$  以上 ( $b$  は定数) かつ、最も少ないノード  $u$  を待機ノードとし、 $u \in U$  とする。
- (4) 各ノードに更新された  $U$  の情報をブロードキャストで通知する。この計算の間に、近隣の他のノードが新たに待機ノードを設定することで  $U$  が更新され、 $U - \{u\}$  のいずれかのノードと  $s$  が通信できるようになった場合、 $U = U - \{u\}$  として再通知する。

### 3.2 動作例

ここでは、3.1 節で説明した中継協調探索アルゴリズム動作例を示す。図 1 のように、マークが  $v_0$  から  $v_{12}$  まで存在し、 $v_0$  から  $v_4$  までが探索済みであるとする。図中の  $v_i$  および  $s_j$  の  $i$  はマーク ID,  $j$  はノード ID を表す。ノードのバッテリー残量は  $s_1 < s_2 < s_3 < s_4 < s_5 < s_6$  であり、 $s_2$  のバッテリー残量は  $b$  より低く、 $s_3$  のバッテリー残量は  $b$  より高いとする。いま、可動ノード  $s_7$  は  $v_4$  の位置に待機しており、 $s_1$  から  $s_6$  が  $v_0$  の位置に存在している。 $aN$  の値は 5 とする。まず未知エリア探索アルゴリズム [5] によってそれぞれのノードの移動先を決定し、各ノードは実際に移動する。そして、例えば  $s_4$  がマーク  $v_7$  に移動し、 $U$  に属するいずれのノードとも通信できなくなったとき、中継協調探索アルゴリズムを実行する。 $s_4$  は  $v_0$  の位置に戻り、周囲の各ノードと 1 ホップ通信を行い、 $v_0$  に近い  $s_1$  から  $s_7$  を検出する。 $s_7$  は  $U$  に属しているので、 $s_1$  から  $s_6$  を  $S$  とする。 $S$  に属するノードのうち最もバッテリーが多い  $s_6$  は  $s_4$  から通知を受け、中継協調探索アルゴリズムを実行する。 $|S| > aN$  であるので、ノードのバッテリー残量が  $b$  以上であり、最も少ない  $s_3$  を待機ノードの集合  $U$  に加える。 $s_3$  は  $v_0$  の位置で待機し、更新された  $U$  の情報をブロードキャストで通知する。

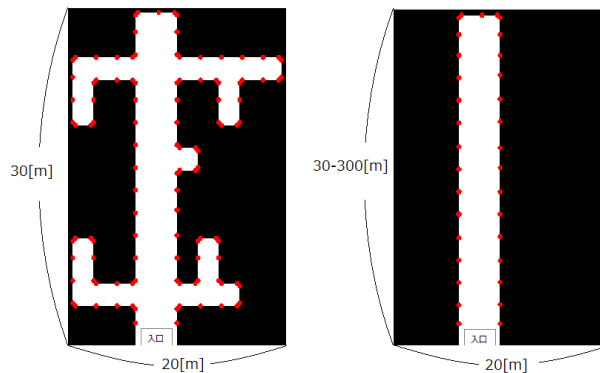


図 2 領域 1(左), 領域 2(右)

## 4. 比較実験

本章では、提案手法のにより屋内領域の探索時間を評価するため、シミュレーションを用いて既存手法との比較実験を行った。

### 4.1 シミュレーション条件

本シミュレーションでは、比較手法と提案手法のアルゴリズムを Java 言語でプログラムし、探索完了時間および各ノードがどの程度情報を共有できているかを比較した。比較手法は未知エリア探索アルゴリズムのみを用いた手法 [5] とする。対象領域は、縦 30[m], 横 20[m] のような空間を想定しており、対象領域内の白い空間が通路、黒い空間は壁、赤丸は AR マーカを示しているとする (図 2)。領域 1 での AR マーカの個数は 111 個であり、全てのノードの初期位置は入口とする。また、各シミュレーションで用いる  $aN$  は 5、可動ノードの移動速度は 1[m/s] と設定した。評価内容は、領域 1 においてノード数を変化させたときの探索開始から探索完了までにかかった時間と総ノード数 20 個において各ノードが探索済みマークの情報をどれだけ共有していたかを示す探索済みマーク認識個数、領域 2 において直線の奥行きを変化させたときの探索開始から探索完了までにかかった時間である。ここで、探索完了とは、入り口に待機している固定ノードにすべての探索可能なマークを 1 つ以上の可動ノードが訪問したことが知られることである。

### 4.2 比較実験の結果および考察

図 3 で示されるグラフは、領域 1 において総ノード数ごとの探索完了までにかかった時間  $[s]$  である。総ノード数が少ない時は、可動ノードを全ての分岐点に待機させるほど余裕が無いので探索時間の差は少ない。一方で、総ノード数が多くなればなるほど、探索時間に差が出ている。可動ノードの総ノード数が待機させるうえで十分な値である

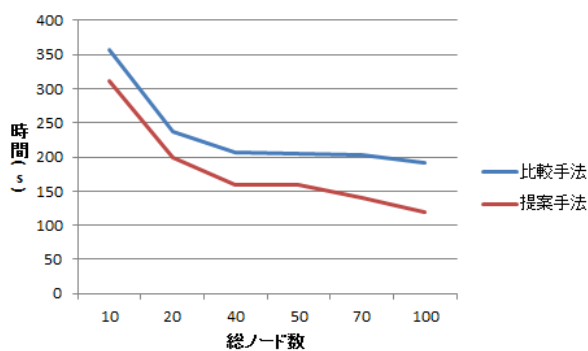


図 3 領域 1 における総ノード数による探索時間の比較

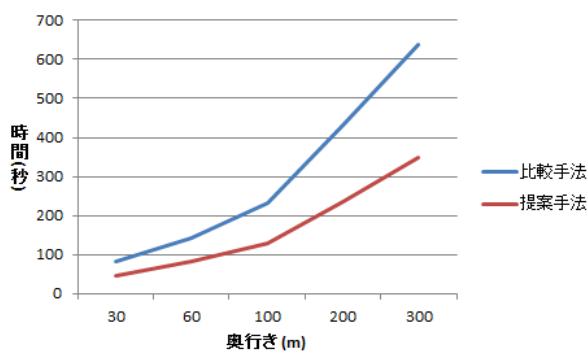


図 4 領域 2 における奥行きによる探索時間の比較

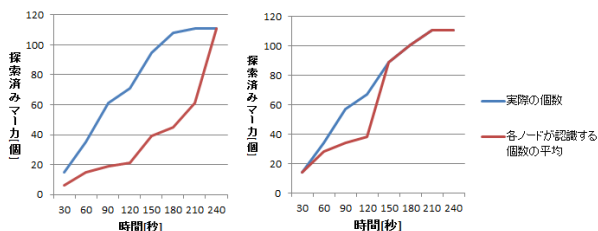


図 5 各ノードが認識する探索済みマーカーの個数  
比較手法 (左), 提案手法 (右)

ならば、いずれの総ノード数でも本稿の提案手法のほうが短い時間で探索を終えることができている。したがって、提案手法は総ノード数が増えれば増えるほど性能が増していくと考えられる。

図 4 で示されるグラフは、領域 2 の直線の奥行きと探索完了までにかかった時間 [s] である。比較手法は探索し入り口まで情報を伝えるために戻ってくるという時間が必要であり、奥行きが長くなるほど提案手法より一層探索時間が長くなっている。したがって、提案手法は終了条件を満たしたことを探索開始位置まで知らせるまでの時間ロスもなくすことができていると考えられる。

図 5 で示されるグラフは、領域 1 で行った実験に関して、実際の探索済みマーカーの個数と各ノードが認識する探

索済みマーカーの個数を表している。図 5 では、描かれている 2 本の線が近いほどうまく情報が共有できていることを意味する。探索が開始した直後は比較手法と提案手法にあまり差はない。しかし、150 秒を超えた時点から提案手法ではすべてのノードが探索済みマーカーの情報を共有できていることが分かる。一方、比較手法は探索が進むにつれ、実際に探索済みとなったマーカーの個数と各ノードが認識する探索済みマーカーの個数の平均の差が開き、自身の周囲を探索し尽くしたノードが、他の未探索マーカー (実際には他のノードが探索済みのマーカー) に移動する中ですべての情報を共有できていく結果となっている。したがって、提案手法は通信環境を整えるために待機ノードをつくることにより効率的に探索できていると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、関連研究の災害救助支援のための屋内 3D ビューマップを短時間で作成することを目的とした、可動ノードの未知エリア探索アルゴリズムをより効率的にするアルゴリズムを提案した。提案手法では、可動ノードを分岐点や一定間隔毎に待機させて各ノードの情報共有を支援することで、探索効率を上げている。既存手法と提案手法の両アルゴリズムの比較実験の結果、本シミュレーションの設定においては、提案手法では各ノードが十分に情報共有でき、探索完了までにかかる時間を最大約 75% に抑えられることが分かった。また直線の領域であれば、平均的に 46.7% 短縮できることを確認した。さらに、提案手法により各ノードが従来手法よりも多くの情報を共有できていることが分かった。

## 参考文献

- [1] 田中秀幸: "AR マーカ技術の基礎と最新動向". 電子情報通信学会誌 97(8), pp.734-740, 2014-08-01
- [2] Christian Koch, Matthias Neges, Markus Konig, and Michael Abramovici: "Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance," *Journal of Automation in Construction*, Vol. 48, pp. 18-30, (2014).
- [3] L. C. Oliveira, A. B. Soares, A. Cardoso, A. O. Andrade, and E. A. Lamounier Junior: "Mobile Augmented Reality enhances indoor navigation for wheelchair users," *Journal of Research on Biomedical Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 111-122, (2016).
- [4] Lingxuan Hu and David Evans: "Localization for mobile sensor networks," *Proc. of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*, pp. 45-57, (2004).
- [5] 勝間亮, 山本真也, 柴田直樹: "災害時の屋内 3D マップ生成のための可動ノードの協調探索手法の提案". マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集 2014(5), pp. 80-84, 2014-12-01
- [6] Shibata, N. and Yamamoto, S.: "GPGPU-Assisted Sub-pixel Tracking Method for Fiducial Markers," *Proc. of J. of Information Processing*, Vol.55, No.1, pp.19-28 (2014).