

## 屋内探索でのノードの往復による通信環境の構築

## Maintaining Network Connectivity by Reciprocating Motion of Mobile Nodes for Indoor Exploration

植村 正人<sup>1</sup> 勝間 亮<sup>1</sup>  
Masato Uemura Ryo Katsuma

## 概要

未知領域のマップを作成するために、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を探索していく際に、ノードの一部を探索させずに、通信を中継する待機ノードとして分岐点や一定間隔毎に設置する手法がある。分岐点や一定間隔毎に待機ノードを多く置きすぎると、多くのノードが情報共有しやすくなるが、探索を行うことが出来るノード数が少なくなってしまう、結果的に探索時間が増加する問題がある。本論文では、この手法における問題点である待機ノードの過剰さを軽減する手法を提案する。提案手法では隣接する二つの待機ノードにおいて、その二つのノード間を一つのノードが往復運動することによって通信接続性を保ちつつもう片方は探索を行わせることで、待機ノードを削減し、探索を行うことができるノードを増やすことが出来る。待機ノードが移動しているため、常に通信できるわけではなく通信遅延は発生してしまうものの、時間経過により従来手法と同様の通信可能範囲を保つことができる。

## 1. はじめに

災害が発生した時に、生存者が屋内に取り残されてしまう場合がある。その時に屋内の様子を知ることが救助にとって重要となる。例えば、地震で倒壊した家具などの下敷きになってしまった人や、怪我をして移動することができない人がいたときに、救助隊到着前や夜間などの救助隊の活動休止中に屋内の様子を自動探索することによって知ることが出来れば、救助を行う経路などを決めることができ有用である。そこで既存研究として、建物内部の自動探索を複数の可動ノードで行う研究がある[2]。各ノードは定期的に他のノードとの通信を行って、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。このとき、探索済みエリアの情報をできるだけ早く共有することが望ましい。しかし、壁や障害物による電波減衰によって、お互い移動中のノード間で情報を共有するまでにかかる時間が長くなってしまふ。その結果、既に他のノードが探索した領域を

再び探索してしまう場合が多い。そこで、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を用いて、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ような手法が提案された[1]。しかし、この研究では分岐点毎にノードを待機させるため、待機ノードの数が多くなってしまう場合が多い。待機ノードが多くなるということは、その分探索に用いるノードが少なくなってしまうため、なるべく待機ノードの数を少なく、探索ノードの数を多くすることが望ましい。そこで、本論文ではこの手法に改良を加え、隣接する二つの待機ノードを一つに減らし、そのノードを二点間で往復移動させることで通信接続性を保ちつつ、探索を行うノードを増加させる方法を提案する。待機ノードが移動しているため、常に通信できるわけではなく通信遅延は発生してしまうものの、時間経過によりすべての待機ノード同士が情報を共有することができる。今回、往復運動を行う二点間の隣接する二つの待機ノードをペアと名付ける。まず、待機ノードをできるだけ減らすように適切なペアの選択を行うアルゴリズムを提案する。ペアが決定した後、片方の待機ノードは探索ノードとして探索を行い、もう片方の待機ノードは往復移動し、各ノードに情報を伝達する。しかし、往復運動を行ううえで隣同士のノードが通信不可能になってしまう場合があるため、それを回避するためのアルゴリズムを提案する。

## 2. 関連研究

上記で述べた屋内協調探索の既存手法[1]を紹介する。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に関する研究があった。

そこでは、災害時になるべく早く正確な屋内 3D ビューマップを自動生成するために、未知の領域に設置されている AR マーカを目印として、協調しながらくまなく探索する可動ノードのアルゴリズムを述べている。AR マーカは数メートル程度の短い間隔で設置されており、

<sup>1</sup> 大阪府立大学, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

可動ノードはマーカに組み込まれている固有のマーカ ID 情報から、マーカを頂点とし、あるマーカから認知可能な他のマーカの集合を辺としたグラフを作成することにより、探索済みの領域や未探索の領域を把握する。

可動ノードには通信機、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いる。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し、それをもとに屋内 3D ビューマップを作成することが目的である。

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決定する。移動が完了すると、新たに未探索なマーカを探し、同様の処理を行っていくことで芽づる式に未探索マーカを発見、訪問していく。建物内にある通路が分岐している場合、一般的には複数のノードが同じ探索ルートを進むよりも、分岐点で別々の方向を探索した方が効率が良い。しかし、探索対象の建物の間取りなどは未知であるため、分岐点でどの方向にどの程度の数のノードを配分すれば最適であるかは予測できない。そこで、探索領域の小さい分岐先に対して多数のノードが進む非効率的なケースを防ぐため、あるマーカに到達したノードが次の移動先を決定するとき、その地点に存在する他のノードと情報交換を行い、移動先候補の各マーカに対してなるべく均等なノード数になるよう配分する。また、例えば行き止まりの場所のマーカを探索し終えた場合のように、周囲に未探索の領域が無い状態のノードについて、そのノードが所持している簡易マップ (3.1.3 項で説明) のうち、最も近い未探索のマーカに移動する。その際の移動経路はホップ数を最短にする経路とし、ダイクストラ法により決定する。そのノードが所持している簡易マップに未探索のマーカが存在しないときは探索が終了したと判断し、ダイクストラ法により探索開始位置への最短経路を決定し、移動を行う。

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。より効率的に屋内探索の情報を共有するために、中継協調探索アルゴリズムを用いる。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比較手法は平均 233 秒、[1] の手法は平均 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。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。

本論文の提案手法では、既存研究において待機させるノードが多くなってしまいう問題点を削減することを目的とした。本論文での提案手法は、既存手法 [1] の適用後に用いられるものである。

### 3. 問題設定

提案手法は既存手法 [1] によって待機ノードが既に配置された状態から適用する。待機ノードの配置例は図 1 のようになる。可動ノードの情報をまとめて受け取る基地局は可動ノードが探索を開始するスタート地点に設置されており、基地局は少なくとも一つ以上の待機ノードと通信可能である。すべての待機ノードは可動ノードであり、半径  $r_c$  [m] 内に存在する他のノードと短距離通信を行うものとする。ただし、壁を越えて通信はできない。各待機ノードは、すべての待機ノードから周囲  $d$  [m] の統合マップ情報を持ち、自身のマップ上の位置を知っているものとする。ただし、 $d$  と  $r_c$  は待機ノード同士の最大距離よりも十分に大きい。また可動ノードが往復運動を行う際には、通信が途切れないように工夫する必要がある (この問題の詳細は 4.2 節で述べる)。そのため、往復運動を行うノード全体に期間  $T$  ごとの連続したタイムスロットを共有させる方法を取る。1 つのタイムスロット開始直後に一定の速度  $v$  で移動を開始し、目標地点に到達したらそのタイムスロットの終了時刻まで停止する。このルールにより、すべての往復運動をするノードの同期をとる。探索を行う領域において、今回曲線状の道はなく、すべて直線状のもののみとする。

本論文で対象とする問題の入出力について述べる。入力として、待機ノードの集合、待機ノードが共有しているマップ情報を与える。それをもとに、往復運動を行うノードの集合を決定し、さらにその移動のタイミングを決定して問題の出力とする。目的関数は、待機ノード数を最小化することである。

## 4. 提案手法

本章では、[1]の手法で待機ノードで過剰となってしまう待機ノードを削減する方法を述べる。

[1]の手法では、分岐点毎に待機ノードを待機させるため、待機ノードが過剰に必要となってしまう。提案手法では、ペア決めアルゴリズムによって隣接する二つの待機ノード同士でペアを組み、ペアの片方を往復運動させ、もう片方を探索ノードとすることで待機ノードの数を削減している。移動タイミング決定アルゴリズムによってどちらが往復運動を行うかを決定する。ペア決めアルゴリズムでは、ペアを作ることができる隣接ノードが少ないものからペアを決めていき、移動タイミング決定アルゴリズムでは、通信接続性を保つために隣接するペアにおいて往復運動を行うノード同士が往復運動の周期の中で確実に通信可能範囲に入るように、往復運動を行うノードを決定している。

以下に、ペア決めアルゴリズムと移動タイミング決定アルゴリズムについて詳しく示す。

### 4.1 ペア決めアルゴリズム

以降では、あるノード  $s_1$  と  $s_2$  が距離  $r_c$  以内に存在するとき、 $s_1$  と  $s_2$  の間に壁がなく、他の待機ノードも存在していない場合に、 $s_1$  は  $s_2$  の ( $s_2$  は  $s_1$ ) の隣接ノードと呼ぶ。待機ノードの数を削減するために、隣接する二つの待機ノードを一つに減らし、そのノードを二点間で往復移動させることで通信接続性を保つ。ここで、適切な待機ノードの組み合わせを考えることで、より多くの待機ノードを削減する手法を提案する。この隣接する二つの待機ノードをペアと呼ぶ。隣接するノードの数が少ないノードは、ペアになり得るノードの数が少ない。そのため、他のペアで数少ない隣接ノードを使われてしまうと、そのノードはペアになることができない。結果として、ペアを作ることができない待機ノードが増えてしまい、全体のペアの数が少なくなってしまう。例えば、図1の配置において、 $A$  は  $B$  としかペアを作ることができないが、 $B$  は  $A, C, O$  の三つとペアを組むことができる。このとき、例えば  $B$  が  $A$  以外とペアになってしまうと  $A$  はペアを作ることが出来なくなり、図3のようになる。今回のアルゴリズムを用いて決定した図2ではペアが7個なのに対して、図3ではペアを5個と少なくなってしまう。このことから、提案手法では、各待機ノードに対して隣接する待機ノードの数を調べ、少ないものからペアにしていくことで、より多くのペアを作成する。

アルゴリズムの詳細は以下の通りである。 $S$  は待機ノードの集合とする。 $E_i$  はノード  $i$  の隣接ノードの集合とする。 $A$  はノードの集合とする。

1. ある待機ノード  $s_i$  から通信可能距離  $r_d$  以内にある待機ノードを隣接ノード集合  $E_{s_i}$  に追加する。 ( $0 \leq t \leq n$ )
2. ある待機ノード  $s_i$  の優先順位  $s_i.priority$  を  $|E_{s_i}|$  とする。
3.  $S - A$  が  $\emptyset$  の場合、操作を終了する。
4.  $S - A$  から  $s.priority$  が一番小さいものを取り出し、 $A$  に追加する。もし複数存在する場合、ID が一番小さいものを  $A$  に追加する。このとき追加された待機ノードのIDを  $k$  とする。 $E_{s_k}$  に属する待機ノードの  $s.priority$  を  $-1$  する。
5.  $E_{s_k}$  の中で  $s.priority$  が一番小さいものを取り出し、 $A$  に追加する。 $s.priority$  が一番小さいものが複数存在する場合、一番IDが小さいものを  $A$  に追加する。追加した待機ノードIDを  $l$  とし、 $s_k.pair$  を  $s_l$  とし、 $s_l.pair$  を  $s_k$  とする。 $E_{s_l}$  に属する待機ノードの  $s.priority$  を  $-1$  する。
6. ステップ3に戻る。

以下に、ペア決めアルゴリズムの動作例を示す。

図1のように待機ノードが  $A$  から  $Q$  まで配置済みであるとする。まず、隣接する待機ノード数を調べる。今回最も隣接する待機ノードの数が少ないものが  $A$  であり、その数が1であるので、隣接するノード  $B$  とペアを組む。そしてペアを組んだ  $A, B$  を省き、再び隣接するノード  $O, C$  の隣接ノード数を調べ直す。その結果、 $O$  の隣接ノード数は2に、 $C$  の隣接ノード数は1になる。次に一番隣接ノード数が少ないものが  $C$  であり、隣接するノード  $D$  とペアを組む。そして再びペアを組んだ  $C, D$  を省き隣接するノード数を調べ直す。これを繰り返すと図2のようになり、ペア決め終了となる。

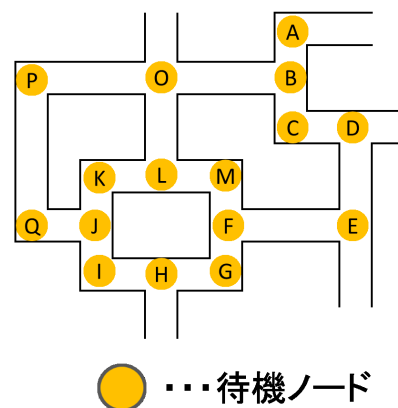


図1: 待機ノードの配置例

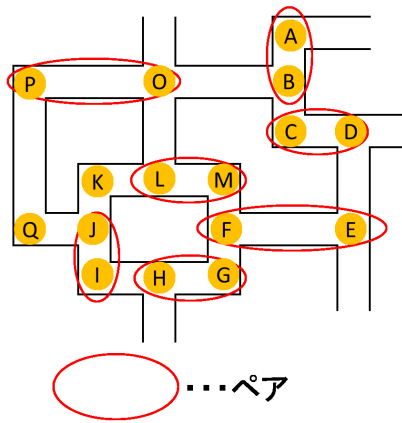


図 2: ペア決定後の図

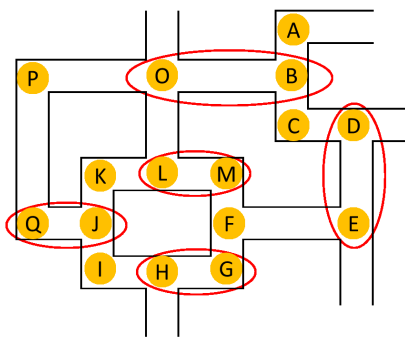


図 3: ペア決めの悪い例

#### 4.2 移動タイミング決定のアルゴリズム

ペア決定後に、往復移動のタイミングとペアのうちのどちらを移動させるかを適切に決める必要がある。不適切に決めてしまうと、ノード間の通信が壁などで完全に遮断されてしまう場合がある。例えば、図4のようなタイミングで往復運動を行った場合、往復運動の間で通信ができるタイミングがなく、通信接続性を保つことが出来なくなってしまう。通信接続性を保つために、隣接するペア同士が一往復の間に通信可能である必要がある。本問題は、タイムスロットが2周期経過すると元の配置に戻るよう限定しており、その中でタイムスロットの周期が十分に経過したときに、すべての往復運動を行うノード（往復ノードと呼ぶ）に情報が行き渡るように各ノードの往復運動のタイミングを決定しなければならない。すなわち、ある任意の往復ノードは最低一つ以上の往復ノードまたは待機ノードと隣接の関係になり、有限回のホップですべての待機ノードと往復ノードに情報が届く必要がある。これを達成するために、情報伝達を模した形のアルゴリズムで各待機ノードを往復ノードとするか探索ノードとして解放するかを決定する。本アルゴリズムでは、基地局を基準点として隣接ノードの役割

(往復/探索/待機)を決定し、さらに次々と役割が決定されたノードと隣接するノードの役割をシーケンシャルに決定していく。最終的に往復ノードとなったノードは、その位置を開始地点として、ペアとなっていたノードの位置の間を往復運動する。

アルゴリズムの詳細は以下の通りである。Rは往復運動を行うノードの集合、Mはペアから自由になり、探索を行うノードの集合とする。

1. 隣接ノード集合の情報を新たに設定する。隣接ノードにおいてペアを持っていないノードの隣接ノードもそのノードの隣接ノードに含め、ペアを持っていないノードを隣接ノード集合から削除する。
2. スタート地点のノード、もしくはスタート地点に隣接するペアを持つノードを R に入れる。
3. R に含まれるノードであり、ペア以外の隣接ノードが R でないものを探し、その隣接ノードを R に入れる。存在しなかった場合、操作を終了する。
4. ステップ3で R に入れたもののペアを M に入れる。
5. M に含まれるノードであり、ペア以外の隣接ノードが M でないものを探し、その隣接ノードを M に入れる。
6. ステップ5で M に入れたもののペアを R に入れる。
7. ステップ3に戻る。

以下に、移動タイミング決定のアルゴリズムの動作例を示す。

図2のようにペアが決まっているとする。まず各ノードに対して隣接ノードを調査した後、スタート地点に隣接するノードである H を往復運動を行うノードとし、そのペアである G を探索ノードとする（ステップ1, 2）。往復運動を行うと決まった H に隣接する I も往復ノードとし（ステップ3）、そのペアである J は探索ノードとする（ステップ4）。探索ノードと決まった G に隣接する F も探索ノードとし（ステップ5）、そのペアである E は往復ノードとする（ステップ6）。探索ノードと決まった J に隣接するノード K, Q はペアを持っていないので、K, Q に隣接する P, L を探索ノードとし、そのペアである O, M を往復ノードとする。これを繰り返すと図5のようにすべてのノードの役割を往復ノード、探索ノード、待機ノードに決定できる。

図5のように役割を決定した場合において、スタート地点の持つ情報が伝わる様子を具体例としてあげる。まず H, I にその情報が伝わる（図6）。その後、往復ノード

ドがもう片方の端に移動した際に、H, I から E, K, M, Q, O に情報が伝わる (図 7). そして、一往復 (タイムスロット二周期) が完了したときに、E, O から B, D に情報が伝わり、すべての待機ノードに情報が伝わる (図 8).

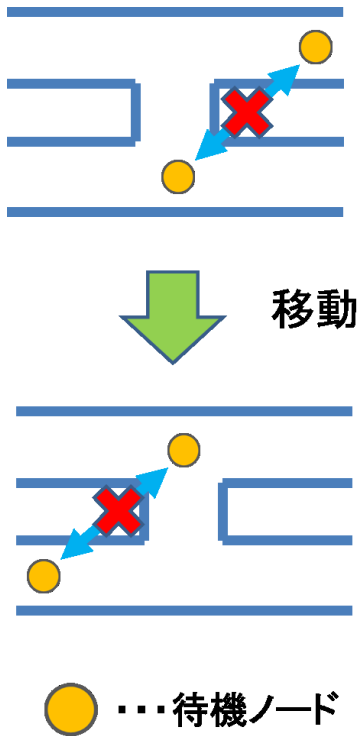


図 4: 通信が遮断されてしまう例

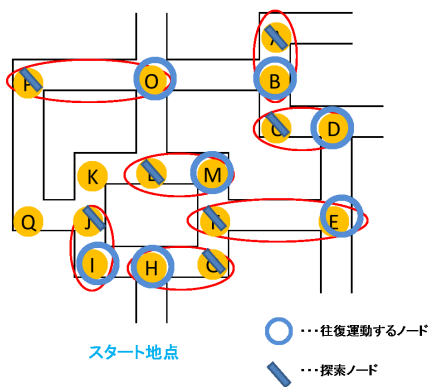


図 5: 往復運動を行うノードが決定後の図

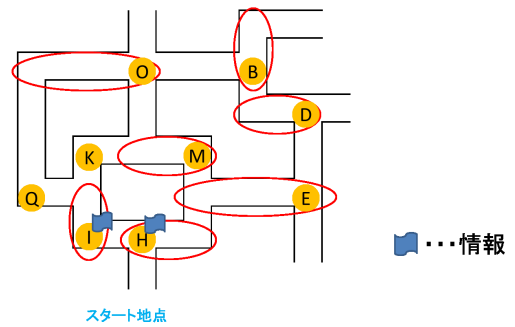


図 6: 情報が伝わる様子 1

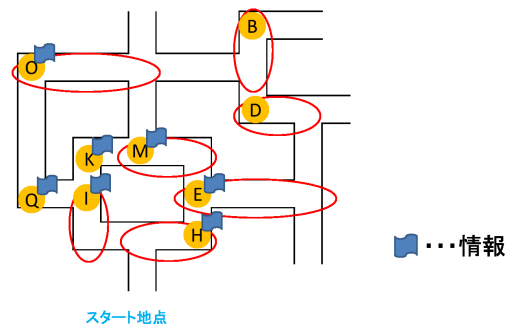


図 7: 情報が伝わる様子 2

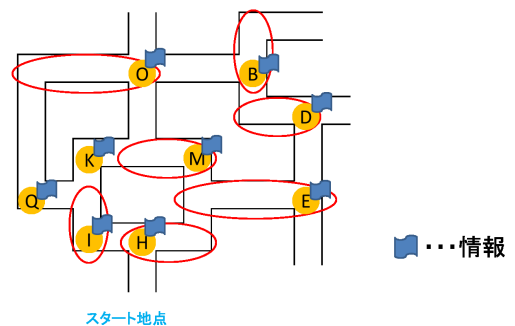


図 8: 情報が伝わる様子 3

## 5. まとめ

本論文では、隣接する待機ノード間の往復移動を用いることで、遅延を許容するかわりに通信接続性を保ちつつ過剰な待機ノードを削減する手法を提案した。理論上は自由なノードが生まれ探索を行うことが可能なノードを増やすことができると考えられる。今後の課題として、手法の有効性を評価する実験を行うことがあげられる。

## 参考文献

- [1] Kenshin Terada, Kodai Ogura, and Ryo Katsuma: “Efficient Indoor Exploration using Mobile Nodes by Maintaining Communicable Region,” *Proc. of IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, (2017).
- [2] 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).