通信を考慮した可動ノードの屋内協調探索手法

Cooperative Indoor Search by Mobile Nodes Considering Communicable Range

寺田 謙伸 [1]　小倉 広大 [1]　勝間 亮 [1]　山本 眞也 [2]　柴田 直樹 [3]
Kenshin Terada　Kodai Ogura　Ryo Katsuma　Shinya Yamamoto　Naoki Shibata

概 要

本稿では，災害後の屋内環境がどのように変化しているかを知ることができる 3D ビューマップを自動作成するために，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移動していくことにより，短時間で屋内をすべて探索する問題を定式化し，解決手法を提案する．我々の研究グループが以前に提案した未知エリア探索アルゴリズムでは，すべてのノードが移動して探索を行うため，通信できるノードが少なくなり，情報共有ができない可能性があった．そのため，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，ノードの一部を探索させずに待機させ，常に他のノードと探索済みの領域に関する情報交換ができる環境を維持することで，探索効率を上げ，短時間で探索を完了させている．本稿で設定したシミュレーションの結果，待機ノードを設置しない従来手法に比べ，探索完了までにかかる時間を約 75%に短縮することができた．

1. はじめに

災害が起きた場合，スムーズな救助活動を行うことが重要である．例えば，地震で倒壊した棚などの下敷きになり身動きの出来なくなった人や，自力での移動が困難な傷病者をいち早く救助することができれば，地震後の火災などの二次災害に巻き込まれるケースを減らすことができる．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，傷病者の発見，救助隊が到着した後の傷病者の運搬経路を決定する際に有用である．このようなスムーズな救助活動を行うためには，屋内のマップや写真などを事前に把握する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手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．また，災害時は救助隊の人数も不足しがちであり，建物を順番に回っていかざるを得ず，到着に時間がかかることもある．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形式で提示することが求められる [1].



図 1: Google ストリートビュー

そこで，特定の領域の状況を詳細に知ることのできる手段として，図 1 のような Google ストリートビューをはじめとした 3D ビューマップがある．3D ビューマップは領域内の各地点から様々な角度で撮影した複数の写真を合成することにより，3D 仮想空間を作り，コンピュータ上で位置と視点を操作することで，あたかも自分が領域内にいて全方位を見渡しているかのように，直観的に領域内の様子を知ることができる．救助隊到着前になるべく多くの建造物に対して 3D ビューマップを作成するため，3D ビューマップを作成する時間を短く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 [3][4][5]，可動ノード [6] 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．

災害救助活動の研究も盛んに行われている．Erdal らはセンサーネットワークを用い，SENDROM データベースに情報を集め，救助活動に役立てることを提案した [7]. 庄子らは災害時に短時間で目的地までの経路を見つける A*アルゴリズムを RoboCup Rescue Simulation を用いシミュレーションし，有用性を示した [8]．しかし，これらは目的地までの経路や情報を示すものであり，マップが未知の状態から全体を探索する際には適用できない．

そこで，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 [9]．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．

[1] 大阪府立大学, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599–8531, Japan
[2] 山口東京理科大学大学, Tokyo University of Science, Yamaguchi, Japan
[3] 奈良先端科学技術大学院大学, NAIST, Ikoma, Nara 630–0192, Japan

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．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 [9] 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．

以降，2 章では関連研究，3 章では問題設定，4 章では提案手法，5 章では比較実験，6 章ではまとめについて述べている．

2. 関連研究

現在までに，災害救助活動の研究は盛んに行われている．Erdal らはセンサーネットワークを用い，SENDROM データベースに情報を集め，救助活動に役立てることを提案した [7]．この研究は，屋内など実際に見てみなければわからない状況や通信できない場所の情報はわからない．庄子らは災害時に短時間で目的地までの経路を見つける A*アルゴリズムを RoboCup Rescue Simulation を用いシミュレーションし，有用性を示した [8]．このアルゴリズムではマップがあらかじめ判明しており目的地を設定すれば短時間で到達できるが，事前にマップ情報がない場合使用することができない．

以上より，既存研究では災害救助を行っている中での支援方法について研究されてきたが，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可能な新たな支援方法を提案した [9]．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，未知の領域をに設置されている 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，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．提案手法ではできるだけ各ノードが探索する箇所の重複を避けるため，ノードの移動先を決定する際には周囲のノードと通信を行い，なるべく移動先の候補に対してノードの数を均等にする．また，各ノードは定期的に他のノードとの通信を試み，通信に成功したノード同士が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．周囲がすべて探索済みとなったノードは，最も近い未探索のマーカに移動する．しかし，このアルゴリズムではすべてのノードがマーカ探索のために移動するため，ノード同士が通信できない状況が頻繁に発生し，探索情報の共有がうまくできていない問題点がある．そのため，過去に他のノードが訪れた場所を別のノードが新たに訪れることになってしまう．

そこで本稿では，より早く屋内 3D ビューマップを生成するために，文献 [9] で提案した可動ノードの未知エリア探索アルゴリズムに加え，ノード同士の情報共有を行いやすくするために，通路の分岐点などにノードを待機させておくための中継協調探索アルゴリズムを提案する．

3. 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．

3.1 環境設定

3.1.1 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，3D ビューマップを生成するための探索を行う．そこで，あらかじめ建造物の建築時もしくはシステム導入時に，AR マーカを数メートル程度の短い間隔で壁に設置しておく．図 2 で示す通り，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る [13]．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

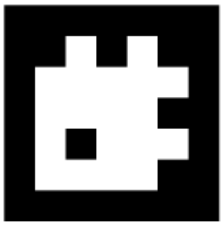


図 2: ID を表現するマーカの例

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．

また，ノードは撮影した画像から曲がり角を判断することは難しい．そこで，通常のマーカの上部に追加のマーカを設置する．この追加のマーカには曲がり角専用の ID が割り振られており，一つの角に対して一つの固有 ID を，角を構成する 2 つのマーカに割り振る．ノードはその ID をもとに，通路の角を知ることができる．

3.1.2 可動ノード

可動ノードとしてはバッテリ駆動の地上走行型ノードや空中飛行型ノードを使用することができ，その例として Lego Mindstorms やクアッドコプターなどがある．Mindstorms はモータを制御するプログラミングが可能な機器やタイヤなどを用いることで，移動が可能なロボットを作成することができる [11]．クアッドコプターは 4 つのプロペラにより安定した飛行をすることができ，無線通信機や小型カメラなどの小型の機器を搭載しても飛行できることが知られている [10]．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いる．通信機は Zigbee を用い，その通信可能距離は機器の電波出力により数メートルから数キロメートルまで様々に変更可能であるが，可動ノードはバッテリを節約する必要があるため，通信可能距離は 10[m] 程度であるとする．小型 PC の例としては LIVA があり，サイズは 118[mm] × 70[mm] × 56[mm] とコンパクトであるため，可動ノードに搭載することが可能である [12]．各種センサについては，例えば火災が伴う可能性のある状況であればサーモグラフィを用いるなどである．

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．

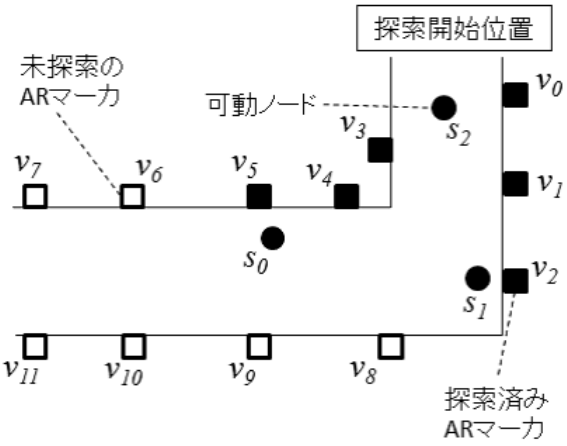


図 3: ノードとマーカの配置例

3.1.3 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，隣接するマーカの関係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．

探索済みのマーカの集合を V とする．あるマーカ $v \in V$ の位置からノードが認知可能なマーカの集合を $E(v)$ とし，E を任意の v に対する $E(v)$ の集合とすると，屋内の簡易マップは無向グラフ $G = (V, E)$ とみなせる．以降の記述では，あるノード s の所持する簡易マップとして，既に訪れたマーカの集合を V_s，あるマーカ $v \in V_s$ の位置から周囲を撮影した画像上で認知可能なマーカの集合を $E(s, v)$ とし，任意の $v \in V_s$ に対する $E(s, v)$ の集合を E_s とする．

簡易マップの例を図 3 に示す．可動ノード s_0, s_1, s_2 が訪れたマーカが $v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ であるとする．探索済みのマーカの位置から確認可能なマーカを線で結んだ簡易マップが図 4 である．図 3 におけるマーカ v_7 はどの可動ノードからも確認不可能なため図 4 の簡易マップには載っておらず，ノードが v_6 や v_{10} などを訪れたときに簡易マップに追加される．この簡易マップ上ですべてのマーカが探索済みになったとき，探索が完了となる．

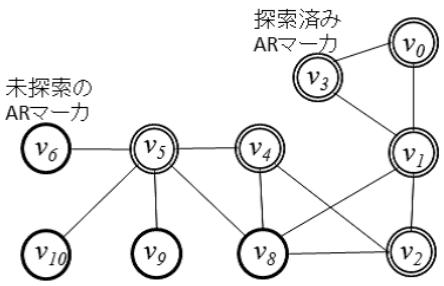


図 4: 簡易マップ

3.2 問題の定式化

対象領域 F 内にあるマーカのうち，3.1.3 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 $V = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$，可動ノードの集合を $S = \{s_1, s_2, ..., s_n\}$，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．

$$s_i.route = \{v_{(s_i,0)}, v_{(s_i,1)}, \cdots v_{s_i,k}\} \tag{1}$$

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．

$$\forall s \in S, E(s) = E(s_0) = \emptyset \tag{2}$$

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．

4. 提案手法

本章では，3. 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（4.1 節で説明）により決定する．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芋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辿るよりも，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．

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ことができる．

4.1 未知エリア探索アルゴリズム

このアルゴリズムは，探索開始位置もしくはマーカに到着した時点で各ノードが実行し，次に訪問するべきマーカを決定する．既に我々が以前に提案したアルゴリズム [9] であり，本稿の提案手法はこのアルゴリズムを基にしている．

ノード s_0 がマーカ v_0 の位置に存在し，v_0 からノードが認知可能かつ未探索のマーカの集合を $E(v_0)$ とする．このとき，s_0 は同じ場所に存在するノードと連携し，$E(v_0)$ の要素数に対して均等な数になるようノードを割り当てる．v_0 に存在するノード数を $E(v_0)$ の要素数で割り切れないとき，均等に割り当てることはできないため，ノード ID とマーカ ID の対応付けを行い，2 個以上の差が出ないようにノードを割り当てる．この際，計算を行うノードは v_0 の位置に存在するノードのうち，最もノード ID が小さいものが行うとする．

ノード s_0 が実行する移動先決定アルゴリズムの詳細は以下の通りである．ここでは，$E(v_0)$ の要素数を $|E(v_0)|$ と記述する．

1. マーカ v_0 の位置 ($v_0.pos$) に到達したとき，$v_0.pos$ に向かって移動中のノードおよび $v_0.pos$ に到達して次の行き先が決定していないノードに対して，ノード

ID 情報および各ノードの位置から認知可能なマーカの情報を交換する．

2. ステップ (1) で交換したノード ID のうち，s_0 が最も小さければステップ (3) を実行．そうでなければ，計算結果を受信するまで待機してステップ (6) へ．

3. ステップ (1) で取得した n 個のノード ID を昇順にソートし，$E(v_0)$ のマーカ ID を昇順にソートする．

4. ステップ (3) でソートしたノード ID のうち，i 番目の ID をもつノードを $E(v_0)$ の $i\%|E(v_0)|$ 番目の要素に割り当てる $(0 \leq i < n)$.

5. 各ノードに対して，割り当てたマーカを通知．

6. 自身に割り当てられたマーカに向かって移動開始．アルゴリズム終了．

4.2 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遠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．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が多いノードのみが処理を行う．

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．

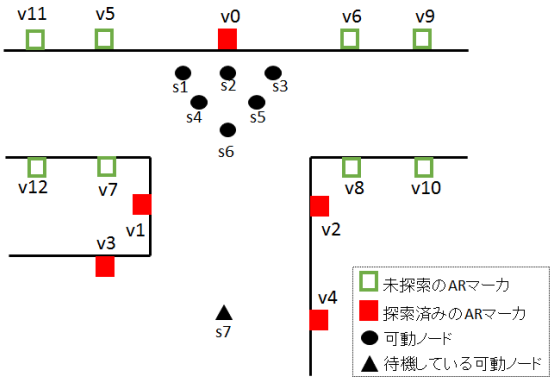


図 5: アルゴリズム開始時の状況

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．

4.3 動作例

ここでは，4.2 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 5 のように，マーカが 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 はマーカ ID，j はノード ID を表す．ノードのバッテリ残量は $s_1 < s_2 < s_3 < s_4 < s_5 < s_6$ であり，s_2 のバッテリ残量は b より低く，s_3 のバッテリ残量は 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 4.1 節で説明した未知エリア探索アルゴリズム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 がマーカ 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．

5. 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．

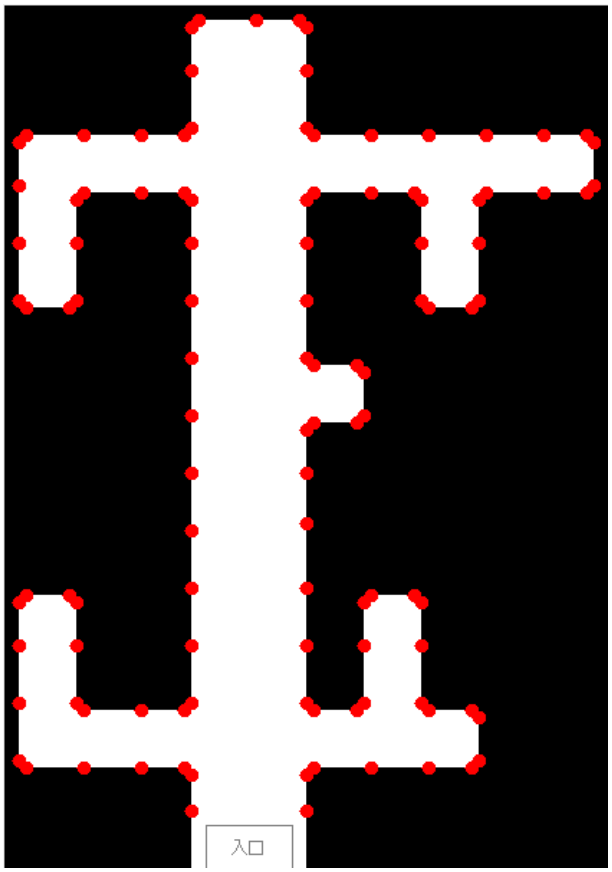


図 6: 対象領域

5.1 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 [9] とする．対象領域は，図 6 で示す縦 30[m]，横 20[m] のような空間を想定しており，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．この領域での 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図 6 の入口である．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，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カの情報をどれだけ共有していたかを示す探索済みマーカ認識個数である．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カを 1 つ以上の可動ノードが訪問したことが知らされることである．

5.2 比較実験の結果および考察

図 7 で示されるグラフは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，

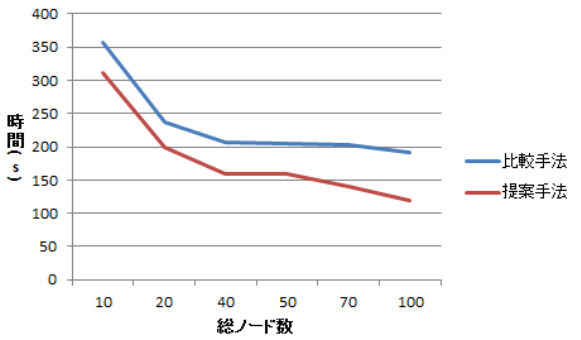


図 7: 総ノード数による探索時間の比較

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 8，9 で示されるグラフは，実際の探索済みマーカの個数と各ノードが認識する探索済みマーカの個数を表している．図 8 および図 9 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の個数と各ノードが認識する探索済みマーカ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（実際には他のノードが探索済みのマーカ）に移動する中ですべての情報を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．

6. 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

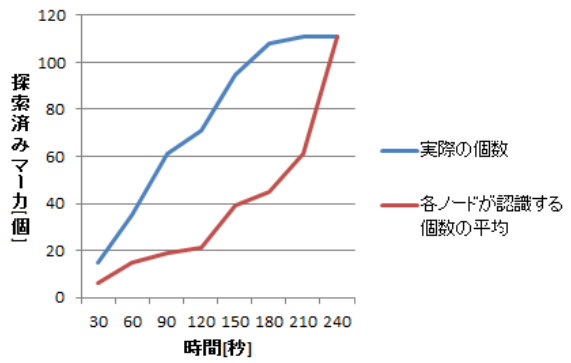


図 8: 各ノードが認識する探索済みマーカの個数（比較手法）

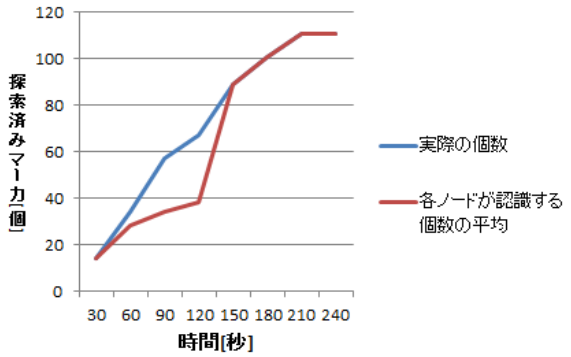


図 9: 各ノードが認識する探索済みマーカの個数（提案手法）

最大約 75%に抑えられることが分かった．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] 消防庁:”警防活動時等における安全管理マニュアル”. *http://open.fdma.go.jp/hiyarihatto/juyo/anzenkanri.html*

[2] You-Chiun Wang, Fang-Jing Wu and Yu-Chee Tseng, : “Mobility Management Algorithms and Applications for Mobile Sensor Networks” *J. of Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 12, Issue 1, pp.7-21 (2012).

[3] 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

[4] 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).

[5] 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).

[6] 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).

[7] Erdal Cayirci,Tolga Coplu: “SENDROM: Sensor Networks for Disaster Relief Operations Management” *Wireless Networks*June 2007, Volume 13, Issue 3, pp. 409423

[8] 庄子佳津雄, 幸塚義之, 伊藤暢浩：”災害救助シミュレーションにおける効率的な経路探索手法の提案”. 全国大会講演論文集 2012(1), pp. 501-503, 2012-03-06

[9] 勝間亮, 山本眞也, 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

[10] Achtelik, M., Tianguang Zhang, Kuhnlenz, K., Buss, M.: “Visual Tracking and Control of a Quadcopter Using a Stereo Camera System and Inertial Sensors,” *Proc. of Int’l. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA 2009)*, pp.2863–2869 (2009).

[11] The LEGO Group: “LEGO Mindstorms,” http://www.lego.com/en-us/mindstorms/

[12] Elitegroup Computer Systems: “LIVA,” http://www.ecs.com.tw/LIVA/

[13] Shibata, N. and Yamamoto, S.: “GPGPU-Assisted Subpixel Tracking Method for Fiducial Markers,” *Proc. of J. of Information Processing*, Vol.55, No.1, pp.19-28 (2014).