

## 移動無線端末の位置情報と通信情報を用いた災害現場地図の自動生成

南 本 真 一<sup>†1</sup> 藤 井 彩 恵<sup>†1</sup>  
山 口 弘 純<sup>†1,†2</sup> 東 野 輝 夫<sup>†1,†2</sup>

本論文では、モバイル無線端末間の無線通信履歴とモバイル無線端末の GPS などから得られる端末の移動履歴を用いて、建物などの位置および形状を推定する手法を提案する。災害発生時に効率の良い傷病者救助活動を行うためには、災害現場の地理情報、特に、現在移動可能な領域を特定することが非常に重要であるが、建物の倒壊や道路の寸断、建造物情報の不足などにより既存の地図では不十分な場合が多い。赤外線やレーザによるレンジセンサ、カメラを用いた画像解析によって建造物を推定する手法も多く研究されているが、ハードウェアコストや測定にかかる人的コストが無視できない。これに対し、提案手法では医療従事者などが保持するモバイル無線端末の無線アドホック通信機能と GPS 測位機能のみを仮定し、それらの人員が領域を歩き回ることによって得られる端末間の通信情報と、端末の位置情報のみを用いて障害物の位置や形状を推定し、対象領域の地図を自動作成する。150m × 190m 内いくつかの建造物が存在する領域を対象に、15 人の移動を想定した実験で提案手法の性能を評価した結果、約 350 秒で推定精度 85% 程度の地図を生成できることを確認した。また、シミュレーション実験により様々な環境で提案手法が有用であることが示された。

### Estimating Disaster Situation Using Mobile Nodes' Position and Wireless Link Information

SHINICHI MINAMIMOTO,<sup>†1</sup> SAE FUJII,<sup>†1</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>†1,†2</sup> and TERUO HIGASHINO<sup>†1,†2</sup>

In this paper, we propose a method to automatically recognize the situation of a disaster site. The method assumes that rescue parties have mobile terminals that are equipped with GPS receivers and wireless communication devices. Using the position information and wireless ad-hoc link information from the terminals, which are automatically recorded during those parties' rescue oper-

ations, the method estimates the presence and shapes of obstacles in the site. The results from the experiments have shown that our method could achieve certain accuracy within reasonable time.

#### 1. はじめに

ユビキタス化が進む現代社会において、モバイル無線端末を用いた様々なサービス、たとえば、ナビゲーションや現在地における周辺情報の検索などの位置情報サービスなどが提案されている。最近では、モバイル無線端末から構成されるアドホックネットワークを、環境対策、防災、医療など様々な分野に応用する研究がさかんに行われている。

我々の研究グループでは、地震などの大規模災害発生現場において、傷病者の重症度と緊急度から治療の優先度を決定するトリアージを支援するために、リアルタイムにセンシングした傷病者の生体情報を無線センサネットワークを介して集約し、災害現場本部で一括管理するシステムに関する研究プロジェクトを、順天堂大学浦安病院救命救急センターなどと共同で実施している<sup>1)</sup>。当該プロジェクトで設計開発しているシステムにより、現場で活動する救急隊員や医療チームに対し、傷病者の現在位置や容態をリアルタイムに提供することができ、治療や病院への搬送などの救命活動に役立てることができる。

そのような災害現場で傷病者の位置を迅速に見出し救命活動を行う際には、災害現場に関する地理情報が重要である。地理情報を利用することで、傷病者がどの建物のそばにいるのかなど、相対的な位置情報を把握することができ、よりスムーズな救命活動が実現できると期待される。また、災害現場の地理情報は救命活動以外にも救助者の避難誘導や物資の配置にも役立つ。

災害現場の地理情報を得る方法として、既存の電子地図を利用することが考えられる。しかし、工場の敷地内など私有領域で発生する局所的な災害事故では、詳細な電子地図が整備されておらず利用できないといった問題や、多数の建造物が密集して存在する領域では、災害や事故の影響で通過可能な経路が変化する可能性が高く、既存の電子地図を利用できないといった問題が考えられる。また、衛星写真から建造物の位置を推定する方法も考えられ

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

るが、解像度の低い写真からは移動可能領域の自動判定が難しく、電子地図データとするには人員による補助作業が必要となる。しかし、災害発生現場は初期人員不足が指摘されており、作業に従事できる人員が確保できない可能性が高い。

したがって、災害現場においては、現場の情報をもとにした最新の見取り図をオンデマンドで生成できることが望ましい。これまでに、現場の地図を作成（障害物の位置を推定）する手法として、赤外線やレーザによるレンジセンサやカメラを用いた画像解析による推定手法が研究されている<sup>2)-6)</sup>。これらの手法では、主にロボットの自律走行支援を対象とし、撮影時の方向や移動情報を正確に記録する必要がある。しかし、災害現場で救命活動が最優先とされる中では、救命活動に専念する人員に測定のための意識的な行為を強いることは現実的でない。

本論文では、複数の救助者が救助活動のために対象領域を歩き回るだけで、対象領域の地図を自動で構築する手法を提案する。提案手法では、アドホック通信機能と、GPS などある程度の誤差で自身の位置を測定する機能を備えた端末（以下、ノードと呼ぶ）が複数存在する環境を想定する<sup>\*1</sup>。提案手法では、各ノードが GPS で自身の位置を定期的に測定すると同時に、その位置情報を隣接ノードにブロードキャスト送信する。各ノードは自身の位置情報と受信した隣接ノードの位置情報を記録し、適当な基地局に集積する。このようにして集めた隣接ノードとの通信ログや GPS ログを利用し、現場における障害物の位置および形状を推定する。ある時刻に 2 ノードが通信できたという事実と、その時刻での位置情報を組み合わせれば、送受信を行ったノードが存在した 2 地点間に障害物が存在しない可能性が高いと考えられる。また、ノードの位置情報からは、ノードが移動したと考えられる軌跡上には障害物が存在しない可能性が高いと考えられる。このように通信ログおよび GPS ログの両方の情報から、移動可能領域と障害物を判定する。

通信ログや GPS ログを用いて高精度な地図を生成するには、無線通信の不確実性や GPS の誤差を考慮しなければならない。無線通信の不確実性を考慮するために、提案手法では、通信ログから地図を生成する際、回折通信の発生確率や見通し通信におけるパケット到着率など、事前に得ているいくつかのデータとある位置での通信成功率から、どのくらいの確率で障害物が存在するかを推定する。また、GPS ログから地図を生成する際、ある一定回数以上ノードが訪れた位置のみを移動可能領域と推定することで、GPS の測定誤差の影響を

\*1 実際の災害現場では、救命活動従事者は情報共有や連絡のために携帯電話も使用する。近年のスマートフォンの多くは無線 LAN などアドホック通信が可能な近距離無線デバイスと GPS を備えていることを考えれば、そのような仮定はきわめて自然である。

軽減する。これらの情報を用いて障害物の存在領域を表す地図を生成したのち、建物の形状を鮮明にさせるため画像処理技術を適用することでより再現度の高い地図を生成する。

提案手法の有用性を示すために、大学構内のある区画の小規模建造物群が点在する 150 m × 190 m の領域を対象に、15 人の移動を想定した実機実験を行った結果、約 350 秒間のログで再現率 85% 程度の地図を生成できることを確認した。また、提案手法の推定誤差や収束時間などについてシミュレーションによる性能評価や考察を行い、提案手法の有用性を示す。

## 2. 関連研究

画像やセンサによって取得した情報を用いて、物体の種類や形状、位置を特定する手法は多くの分野で研究されている。たとえば ITS では、車両の安全走行や自律走行の支援を目的に、車載センサ（ミリ波センサなどのレーザレンジセンサ、ステレオカメラ、赤外線センサなど）を用いた歩行者や路上落下物の特定<sup>2)</sup>、近接して走行する他車両の存在位置特定<sup>3)-5)</sup>、標識認識<sup>6)</sup>などの技術が研究されている。

また、モバイルロボットに関する分野では、災害発生現場などあらかじめ環境情報を取得できない状況において、ロボットの自律移動制御を実現するために、ロボットが移動可能な領域に関する情報を生成する手法が提案されている。特に、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる手法<sup>7),8)</sup>では、ロボットの位置推定と環境推定を同時に行う。ロボットがセンサやカメラを用いて取得した移動軌跡やセンシング情報から局所的な地図を生成するとともに、推測航法 (dead reckoning) から得られるロボットの位置を組み合わせ、領域の地図を生成する。これらの研究では、姿勢を固定して測距デバイスを対象に向けるなど測定のための行為が必要となる。ロボットは移動制御の情報を自身で把握できるが、本研究のように人間に適用することは難しい。

さらにセンサネットワーク分野では、ノード間の接続情報のみを用いてノードが存在しない hole と呼ばれる領域を推定する手法が提案されている<sup>9),10)</sup>。しかし、これらの手法は静止したセンサノードを非常に高密度に設置する必要があるため、災害時における現場地図の作成といった用途には適していない。このように、これまでにアドホック無線通信と GPS といった汎用的な機器のみで、特別な測定行為を必要とせず現場状況を推定する試みは、これまでになされていない。一方、提案手法のように、情報共有のために救命活動従事者が保持するスマートフォンのような GPS 付き無線 LAN 端末のみを仮定し、特別なハードウェアを必要としないことは大きな利点である。

### 3. 提案する地図生成法

#### 3.1 想定環境

図 1 に提案手法の想定環境を示す。提案手法では、ノードとして Zigbee や無線 LAN のような、通信距離が数十メートルから百メートル程度である無線通信機器ならびに GPS レシーバを装備した端末を保持して対象領域を移動する人員を想定する。対象領域は屋外で、ビルなどの障害物とその他の移動可能領域（道路や空き地など）から構成されているとする。ノードは領域内の被災者の救助活動を行いつつ、移動可能領域内を巡回するように移動するものとする。

各ノードは GPS を用いて自身の位置を測定する。ノード  $i$  が GPS から得る自身の位置情報を  $p_i$  で表す。 $p_i$  は正しい位置からのランダムな誤差を含むとする。ノード  $i$  は定期的に自身の位置  $p_i$  を測定し、自身の ID  $i$ 、測位時刻  $t$  とともに、組  $(i, p_i, t)$  を記録する。この組を GPS ログと呼ぶ。また、各ノード  $i$  はその位置情報  $p_i$  をビーコンメッセージとして周辺ノードに無線ブロードキャスト送信する。ノード  $j$  はノード  $i$  から  $p_i$  を含んだビーコンメッセージを受信した場合、ノード  $j$  自身の最新の位置  $p_j$  と受信時刻  $t'$  とともに、組  $(i, j, p_i, p_j, t')$  として記録する。この組を通信ログと呼ぶ。受信時刻  $t'$  に自身の位置  $p_j$  を測定しなかった場合には、前後の時刻に取得した位置から線形補完することで得られた位置情報を利用する。なお、測位やビーコンメッセージの送信タイミングは、GPS の測時機能

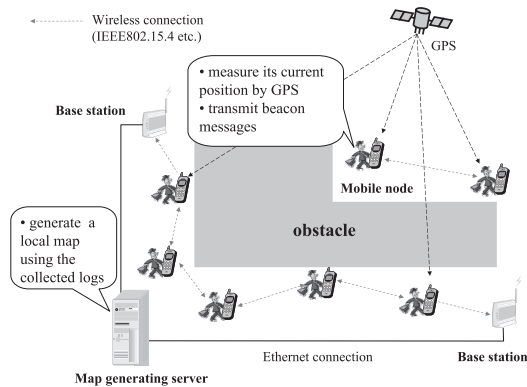


図 1 提案手法の想定環境

Fig.1 Environment for proposed algorithm.

を用いてノード間でおおよそ同期しているものとする。

ノードは記録した GPS ログおよび通信ログを、何らかの方法である単一の計算サーバへ送信する。これは、たとえば図 1 のように、領域の何力所かに基地局を設置し、ノードが基地局と通信可能なときに記録したログを一括送信するなどにより実現できる。計算サーバでは、収集されたすべての GPS ログおよび通信ログを用いて、障害物の位置および形状の推定を行う。

本論文では、この障害物推定のための集中型アルゴリズム（地図生成アルゴリズム）を設計し、その評価を行う。

#### 3.2 アルゴリズム設計

図 2 に地図生成アルゴリズムの処理概要を表す。アルゴリズムは (i) GPS ログを用いた推定手法（図 2(a)）、ならびに (ii) 通信ログを用いた推定手法（図 2(c)）の組合せで構成される。GPS ログを用いた推定手法では、GPS ログの集積から移動可能領域を推測し、クロージングと呼ばれる画像処理技術を用いて推測結果を修正する（図 2(b)）。通信ログを用いた手法では、2 ノードの位置関係とそのときの通信状況から、障害物を推定する（図 2(c)）。そして 2 つの推定結果を合成し（図 2(d)）、最後に障害物の四角形近似を行うことで地図を完成する（図 2(e)）。

以下では、それぞれの推定手法における技術課題と、それに対する我々のアプローチの概要を述べる。

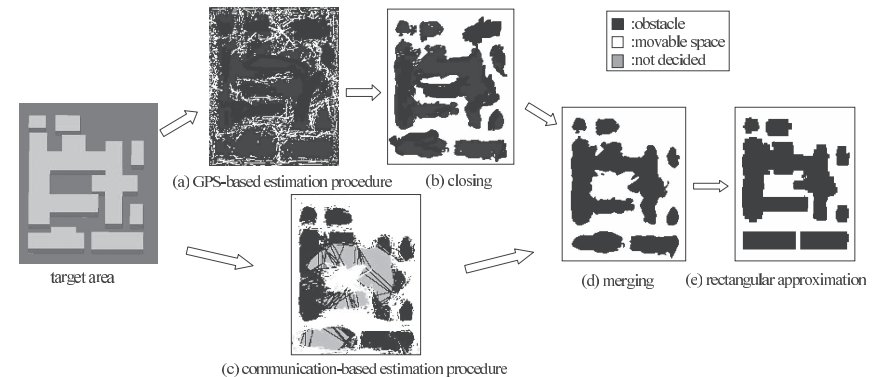


図 2 アルゴリズムの概要

Fig.2 Algorithm outline.

### 3.2.1 GPS ログを用いた推定手法

本論文では、ノードは移動可能領域のみを移動するものと仮定しているため、各 GPS ログ  $(i, p_i, t)$  に対し、 $p_i$  には障害物が存在しないと考えられる。また、GPS 測位の時間間隔を  $\Delta t$  としたとき、2 つの GPS ログ  $(i, p_i, t)$ 、 $(i, p'_i, t + \Delta t)$  を結ぶ線分上にも障害物が存在しない確率が高いと考えられる。ただし、以下の問題を考慮する必要がある。(1) まず、ノードが取得した位置情報には誤差が含まれるため、実際にはその位置に障害物が存在する可能性もある。(2) 次に、ノードの全 GPS ログを集積しても、ノードが実際に訪れていない領域については、障害物が存在するか否かが分からない。

(1) に対しては、全 GPS ログ情報を用い、訪問回数がある一定数以上の位置を移動可能領域と判断することで、実際には障害物である領域を移動可能領域と判定する可能性を軽減する。また、(2) に対しては、移動可能領域と判断された位置を起点としてクローリングと呼ばれる画像処理プロセスを適用し、高い確率で移動可能領域を推定する。これらの詳細は 4.1 節で述べる。

### 3.2.2 通信ログを用いた障害物推定

提案手法では通信の成否のみを利用するが、通信情報を用いた障害物推定の別のアプローチとしては、自由空間伝搬損失モデルや平面大地伝搬損失モデル<sup>12)</sup> などの適当な伝播損失モデルに GPS で得られる 2 ノード間の距離を与えることにより導出された RSS 値（理論値）と、ノード間通信における受信電波強度（RSS）の実測値を比較し、実測値が理論値とどの程度乖離しているかにより、2 ノード間の障害物の有無を推定する方法が考えられる。しかし、無線伝播は障害物からの反射や回折などのシャドウイングだけでなく、利得、指向性や S/N 比などのアンテナ特性や、マルチパスや端末の移動によるフェージングなどの様々な要因を受ける。このことを検証するために、Jennic 社製の JN5139<sup>11)</sup> を用いて簡易実験を行った。JN5139 は 2.4 GHz 帯を利用する IEEE802.15.4 規格により通信を行う無線ノードである。今回の実験では、見通しが良く周囲に建物が存在しない屋外の 2 地点を選び、2 つの JN5139 を地面から高さ 1 m に配置した環境において、送信電力を 0 dBm とし、毎秒 26 バイトの packets を合計 10 packets 送信したときの 2 ノード間の距離に対する受信電波強度の値を計測した。図 3 に、2 ノード間の距離に対する受信電波強度の理論値と実測値を示す。理論値として、2.4 GHz 帯を想定し波長  $\lambda$  の値を 0.125 m としたときの自由空間伝搬損失モデルでの値（Free-space）と、大地の反射係数  $\gamma$  の値を  $-1$  としたときの平面大地伝搬損失モデルでの値（Two-ray）を導出した。実測値のエラーバーは受信電波強度の最大値と最小値を表す。実験結果より、周囲に障害物がまったく存在しない環境でノード

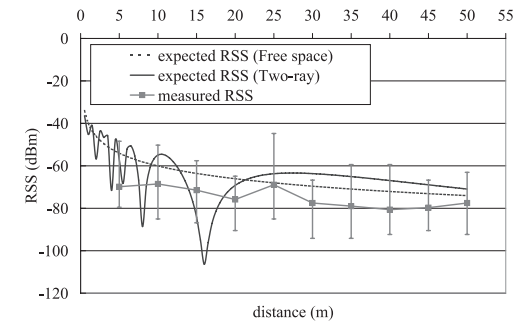


図 3 距離に対する受信電波強度  
Fig. 3 Expected and measured RSS.

ドが静止している場合であっても、観測された受信電波強度は非常に大きなばらつきが生じ、理論値とも異なることが分かった。ノードの移動を想定した場合、受信電波強度はさらに不安定になることが予想されるため、理論値と実測値の乖離の程度から、障害物の有無を予測するのは困難であると考えられる。

ここで、ある 2 ノードが互に見通すことができ、かつノード間の距離がある値  $R$  以内の場合のみ packets を受信できるという単純な通信モデル（以下、見通し距離通信モデルと呼ぶ）を想定した場合、以下のようにノード間の障害物の有無を推定できる。(1) packets が 2 ノード間で送受信された場合、それらのノード間には障害物が存在しない。(2) 2 ノード間の距離が  $R$  以内であるにもかかわらず packets を受信できなかった場合、それらのノード間のどこかに障害物が存在する。そこで、提案手法は（もし 2 ノード間に障害物がなければ）理論上は正しく packets を受信すべき状況において実際にどの程度 packets を受信できたかの割合（packets 到達率）を利用することにより、2 ノードの間に障害物が存在するかを推定する。packets 到達率を利用することにより、受信電波強度を利用する場合と比較して安定的に障害物の有無を推定できることを確認するために、前述の受信電波強度測定実験から送信電力を  $-18$  dBm に変更し、その他は同じ環境設定で packets 到達率を測定した。JN5139 の受信電波強度閾値は  $-96$  dBm であるため、このときの平面大地伝搬損失モデルに基づく最大通信距離は約 55 m となる。図 4 に packets 到達率を示す。平面大地伝搬損失モデルに従ったとき、理論上は packets 到達率が 100% になるのに対し、実測値はおおよそ 90% を超えており、2 ノード間に障害物が存在しない場合、ノード間に障害物がないことが比較的容易に推定できる。

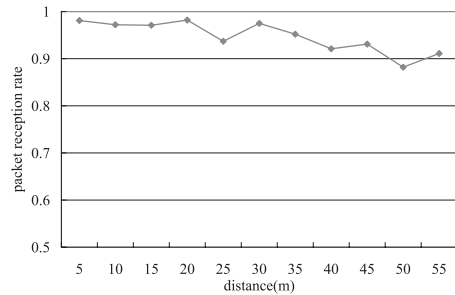


図 4 距離に対するパケット到達率  
Fig. 4 Measured packet reception rate.

しかし、障害物以外の要因が無線伝播に与える影響が大きく、実際に観測されたパケット到達率が見通し距離通信モデルと大きく乖離する場合、以下のような問題が多数生じることにより、障害物の推定精度が悪化する可能性が高い。(a) 障害物や地面からの反射波や、同一周波数帯の無線との干渉などに影響され、前述の見通し距離通信モデルでは受信できるはずのパケットが受信されない。(b) 2 ノード間距離は  $R$  以下であるが互に見通すことができない(ノード間に障害物が存在する)場合に、パケットが受信される。無線伝播に影響を与える個々の要因に対するモデルや、それらのモデルが実際の現象とどの程度乖離するかについては、これまでに数多く研究されているが<sup>(12)</sup>、実環境では、それら複数の要因が環境に依存して複雑に影響しあうため、既存のモデルを組み合わせ、障害物以外の要因がパケット到達率に与える影響を予測するのは非常に困難であると考えられる。

このことを示すために、回折を例として、実環境における回折がパケット到達率に与える影響を既存の回折モデルからどの程度予測できるかについて検証した。周辺に建造物がないコンクリート建造物の角を利用し、図 5 に示すような地点 1~10 のうち 2 地点の地面にノードを置いてパケット到達率を測定した。地点 1 または 2 を送信ノードの位置とし、送信電力  $-18\text{ dBm}$  で 10,000 パケットを送信し、地点 3 から 10 までのいずれかを受信ノードの位置とした。前述のように、JN5139 のパケット受信電波強度閾値は  $-96\text{ dBm}$  である。また、各 2 地点間での受信電波強度の理論値をナイフエッジ回折モデル<sup>(13)</sup> を用いて求めた。表 1 に各ノードにおけるパケット到達率の実測値およびナイフエッジ回折モデルによる受信電波強度の理論値を示す。結果より、送信点と受信点の多くの組において、回折モデルとパケット到達率の実測値が一致しているが、送信点 2 と受信点 5 の組のように、理論上は回折

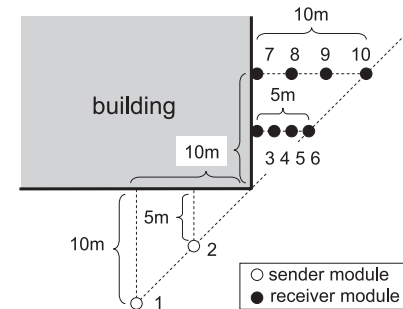


図 5 回折実験の環境  
Fig. 5 Diffraction propagation.

表 1 ナイフエッジ回折モデルでの受信電波強度値とパケット到達率の関係  
Table 1 RSS calculated by knife-edge diffraction model.

送信点 \ 受信点		受信点							
		3	4	5	6	7	8	9	10
1	パケット到着率 (%)	0	0	0	93.3	0	0	0	90.7
	回折モデルでの受信電波強度 (dBm)	-108.7	-104.9	-99.2	-90.6	-112.7	-109.0	-103.1	-93.1
2	パケット到着率 (%)	0	13.7	59.8	94.4	0	0	0	91.7
	回折モデルでの受信電波強度 (dBm)	-103.7	-100.7	-94.7	-87.0	-108.3	-104.6	-99.0	-90.6

通信によりパケット到達率が 100%となるが、実際に観測されたパケット到着率は 59.8%となり、回折以外の要因によりパケット到達率が低下しているのが確認された。

このように、様々な要因を考慮してパケット到達率を予測することは非常に困難である。そこで、パケット到達率を予測するかわりに、図 4 や表 1 で述べたような実験結果から求められる障害物を迂回して通信が成功する確率や、障害物が存在しないにもかかわらず通信が成功しない確率を考慮し、ある通信ログに基づき障害物として判定された場合のもっともらしさと、ある通信ログに基づき移動可能領域として判定された場合のもっともらしさを推定に利用することを考える。そして、それらのもっともらしさを障害物として判定された回数および移動可能領域として判定された回数によってそれぞれ重み付けされた確率から、ノード間に障害物が存在するか否かを決定する。これらの詳細は 4.2 節で述べる。これにより、6 章で述べる実機実験で示すように、障害物以外の要因を考慮していなくても、地図の

生成が可能であることを示す．

#### 4. アルゴリズムの詳細

本章では，地図生成アルゴリズムの詳細設計を述べる．提案手法では，対象領域をセルに分割し，それぞれのセルについて障害物の有無判定を行う．セルサイズは人の大きさや移動速度などを考慮して決定するものとし，デフォルト値を 1m とする．以降，対象領域を  $x$  方向に  $m$  個， $y$  方向に  $n$  個のセルに分割したときの各セルを  $\{g_{a,b} | 1 \leq a \leq m, 1 \leq b \leq n\}$  で表す．

##### 4.1 GPS ログを用いた推定手法

本節では，収集された GPS ログに基づき障害物の位置を推定するアルゴリズムを記す (図 6)．まず，各セルはノードの訪問回数を保持するとし，その初期値を 0 とする．各 GPS ログ  $(i, p_i, t)$  について，位置  $p_i$  を含むセルには障害物が存在しないと考え，そのセルのノードの訪問回数を 1 増やす．さらに，連続する時刻の 2 つの GPS ログ  $(i, p_i, t), (i, p'_i, t + \Delta t)$  について，線分  $p_i p'_i$  を含むセルをノードが通過したと見なし，それぞれのセルの訪問回数を 1 増やす．最終的に得られた訪問回数  $g_{a,b}$  が，ある閾値  $thr_{stra}$  以上であれば障害物ではないと判定し， $thr_{stra}$  未満であれば障害物が存在すると判定する．

ここで，閾値  $thr_{stra}$  の決定方法について述べる．ノード数を  $N$ ，領域のサイズを  $x \times y \text{ m}^2$ ，セルサイズを  $g \text{ m}$ ，GPS ログの収集時間を  $T \text{ s}$ ，ノードの歩行速度を  $V \text{ m/s}$  とするとき，あるセルに存在するノードが，辺を共有する隣接セルに移動するのに要する平均時間は  $g/V \text{ s}$  である．このとき，すべてのノードが訪問したセル数の総和は  $N \times g/V$  である．領域内に存在するセルの総数は  $xy/g^2$  であるため，領域内に障害物が存在せず，ノードが Ran-

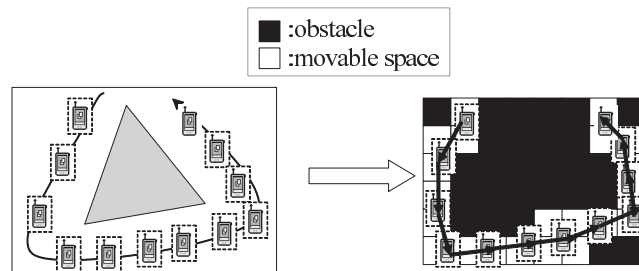


図 6 GPS ログを用いた推定例  
Fig. 6 GPS-based estimation procedure.

dom Waypoint モビリティモデルに従って移動した場合に，あるセルの訪問回数の期待値は  $gTVN/xy$  である．実際には領域内には障害物が存在するため，訪問回数の期待値は  $gTVN/xy$  以上となることが期待される．よって，訪問回数  $g_{a,b}$  が  $gTVN/xy$  よりも小さいセルは障害物である可能性が高いと考えられるため， $thr_{stra} = gTVN/xy$  と定義する．

ただし，移動可能領域であるが，障害物付近などノードが訪問しにくいセルでは，訪問回数が閾値  $thr_{stra}$  を超えないため，上記の方法では，障害物と判定される可能性がある．これらのセルは，通信ログを用いた推定結果との合成により正しく推定される可能性もあるが，セル上で通信が十分行われなかった場合などには，通信ログを用いた推定結果においても障害物として判定され，合成後の推定結果でも障害物として推定される可能性が高い．そこで，提案手法では，画像処理技術の 1 つである膨張・収縮処理を繰り返し行うクロージング<sup>14)</sup>を基本とした推測技術を適用し，周辺のセルが移動可能領域であるという情報を利用することにより，移動可能領域であるにもかかわらず障害物として推定されたセルの数を減らすことを考える (図 7)．以降，障害物と判定されたセルを黒，移動可能領域と判定されたセルを白の 2 値画像として扱う．まず，白い領域 (移動可能領域と判定された領域) の膨張処理を行う．膨張処理では，あるセル  $g_{a,b}$  が黒で，その周辺の 8 つのセルのうち，白と判定されているセルの数が 5 以上であるとき， $g_{a,b}$  を白に変更する．次に，白い領域の収縮処理を行う．収縮処理では，あるセル  $g_{a,b}$  が白で，その周辺の 8 つのセルのうち，黒の数が半数以下のとき， $g_{a,b}$  を黒に変更する．上記の膨張処理を  $k$  回行った後，収縮処理を  $k$  回行うことにより，最終的な推定結果を導出する．ここでは，経験的に  $k = 3$  を適用する．このような処理を行うことにより，別々の道路として誤推定された 2 つの白い領域をつないだり，細かい障害物として誤推定された小さな黒い領域を除去したりする．

##### 4.2 通信ログを用いた推定手法

本節では，収集された通信ログに基づき，領域内の各セル  $g_{a,b}$  について障害物の有無判定を行うアルゴリズムを記す．その際，セル  $g_{a,b}$  ごとに障害物と判定された回数を保持する変数  $T_{a,b}$  と障害物ではないと判定された回数を保持する変数  $F_{a,b}$  を導入する．これらの

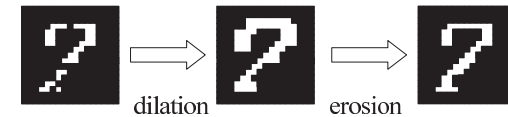


図 7 クロージングの適用例  
Fig. 7 Closing technique.

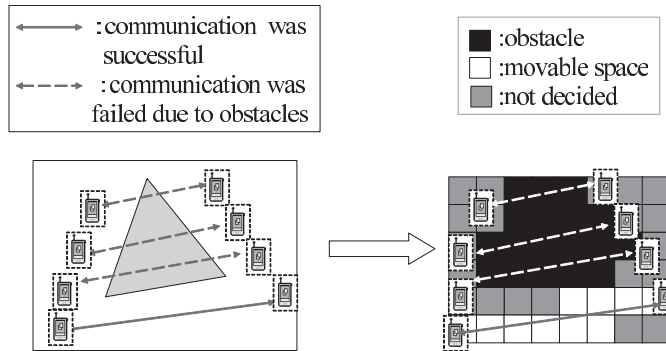


図 8 通信ログを用いた推定例  
Fig. 8 Communication-based estimation procedure.

値に基づいて最終的にセルが障害物かどうかを判定する。なお、 $T_{a,b}$  と  $F_{a,b}$  の初期値は 0 とする。

アルゴリズムの手順は以下のとおりである (図 8)。はじめに、ある時刻  $t \in [0, T]$  における GPS ログ  $(i, p_i, t)$  と  $(j, p_j, t)$  に含まれる  $p_i$  および  $p_j$  の距離が、パケット受信可能な最大距離  $R$  以内である場合、通信ログ  $(i, j, p_i, p_j, t)$  または  $(j, i, p_j, p_i, t)$  が存在するかを確認する。もし通信ログが存在する場合、見通し通信が発生したと見なし、線分  $p_i p_j$  を含むすべてのセルに障害物はないと推定し、線分上の各セル  $g_{a,b}$  に対応する  $F_{a,b}$  の値を 1 増やす。一方で、通信ログが存在しない場合は、2 ノード間の通信が障害物によって遮られたと考える。このとき、線分  $p_i p_j$  上の一部のセルが障害物である可能性が高いが、線分  $p_i p_j$  上のどのセルが障害物であるかが分からないため、線分  $p_i p_j$  上のすべてのセルが障害物であると判定し、線分上の各セル  $g_{a,b}$  に対応する  $T_{a,b}$  の値を 1 増やす。

次にセル  $g_{a,b}$  ごとに、 $T_{a,b}$ 、 $F_{a,b}$  を用いて、 $g_{a,b}$  に障害物が存在するかを推定する。ただし、2 ノード間に障害物が存在しないにもかかわらず、電波の干渉などの理由により通信できなかった場合には、2 ノード間の直線上に存在するすべてのセルが障害物と判定されてしまう可能性がある。逆に、2 ノード間に障害物が存在するにもかかわらず、回折によって通信が行われ、その結果 2 ノード間の直線上に存在するすべてのセルが障害物と判定される可能性もある。また、GPS で測定された位置には誤差が含まれることなども考慮すると、単純に  $T_{a,b}$  と  $F_{a,b}$  の値を比較するだけで判定することは好ましくない。

そこで、提案手法では実環境における通信の成否と障害物の有無との関係を確率で表し、

その確率に基づき障害物かどうかを決定する。ここで、あるセル上を通過して、ノード間で通信が行われたという事象を  $A$  とし、 $A$  が起こる確率を  $P(A)$ 、そのセル上に障害物があるという事象を  $B$  とし、 $B$  が起こる確率 (事前確率) を  $P(B)$  とする。よって、 $P(B|A)$  は通信が行われた場合に障害物が存在する確率を表す。あるセル上を通過して通信が行われたという情報が与えられたときに障害物が存在する事後確率  $P(B|A)$  はベイズの定理より式 (1) のように表される。

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)} \quad (1)$$

同様に、セル上で通信が行われなかったという情報が与えられたときに障害物が存在する事後確率  $P(B|\bar{A})$  は式 (2) のように表される。

$$P(B|\bar{A}) = \frac{P(\bar{A}|B)P(B)}{P(\bar{A})} \quad (2)$$

すなわち、あるセルを通過して通信された (されなかった) という事実により、障害物が存在する確率は事前確率  $P(B)$  の  $P(A|B)/P(A)$  倍 ( $P(\bar{A}|B)/P(\bar{A})$  倍) となる。そこで提案手法では、式 (3) のように、各セル  $g_{a,b}$  が障害物であるかを判定するための指標として、これらの変化量を障害物の有無の判定回数  $T_{a,b}$ 、 $F_{a,b}$  の値でべき乗した値  $p_{a,b}$  を利用し、 $p_{a,b}$  が閾値  $thrs_{com}$  以上であるとき、 $g_{a,b}$  が障害物であると判定する。

$$p_{a,b} = P(B)(P(\bar{A}|B)/P(\bar{A}))^{T_{a,b}}(P(A|B)/P(A))^{F_{a,b}} \quad (3)$$

ここで、セルに障害物が存在する確率  $P(B)$  の初期値は、通信の成否が分からない状態ではセルに関する障害物の情報がないため  $1/2$  とする。よって、 $P(A) = P(A|B)P(B) + P(A|\bar{B})P(\bar{B})$ 、 $P(\bar{A}) = P(\bar{A}|B)P(B) + P(\bar{A}|\bar{B})P(\bar{B})$  および  $P(B)$  と  $P(\bar{B})$  の初期値が  $1/2$  であることから、式 (3) を以下のように展開する。

$$p_{a,b} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{2P(\bar{A}|B)}{P(\bar{A}|B) + P(\bar{A}|\bar{B})} \right)^{T_{a,b}} \times \left( \frac{2P(A|B)}{P(A|B) + P(A|\bar{B})} \right)^{F_{a,b}} \quad (4)$$

5 章および 6 章の性能評価では、3.2 節の実験結果において、障害物が存在する場合に回折などにより通信が行われた場合がほとんどなかったことから、 $P(A|B) = 0.1$ 、 $P(\bar{A}|B) = 0.9$  とする。同様に、3.2 節の実験結果において、障害物が存在しない場合にパケットロス率が 0.1 であったことから、 $P(A|\bar{B}) = 0.9$ 、 $P(\bar{A}|\bar{B}) = 0.1$  とする。また、3.2 節の実験結果において、見通し距離通信モデルと実際の無線伝播におけるパケット到達率の乖離は約 10% であり、障害物の誤判定を行う確率が最大でも 20% 程度であることから、 $T_{a,b} = 4$ 、 $F_{a,b} = 1$  を式 (4) に代入した際の  $p_{a,b}$  の値を閾値  $thrs_{com}$  とする。なお、 $T_{a,b}$  と  $F_{a,b}$  の値がともに

0 である場合には、障害物の有無は不明である（障害物の有無は分からない）とする。これは、セル上  $g_{a,b}$  に障害物があるが、障害物の大きさがノードの無線距離よりも大きく、ノード間で通信できない場合と、セル上  $g_{a,b}$  に障害物が存在しないが、たまたまノード間で通信が行われなかった場合の 2 つの場合が考えられ、障害物の有無を決定できないためである。

#### 4.3 推定結果の合成

4.1 節および 4.2 節で述べた GPS ログ、通信ログを用いた障害物の推定手法から導出された推定結果を合成することにより、各セル  $g_{a,b}$  が障害物かどうかを最終的に判定する。あるセル  $g_{a,b}$  が障害物であるかどうかは以下のように決定する。

- 各セルについて GPS ログを用いた推定と通信ログを用いた推定の両方で障害物が存在すると判定された場合は、そのセルを障害物と判断する。
- GPS ログを用いた推定と通信ログを用いた推定の両方で障害物が存在しないと判定された場合は、そのセルは障害物でないと判断する。
- GPS ログを用いた推定と通信ログを用いた推定で結果が異なる場合は、障害物は存在しないと推定する。通信ログを用いたアルゴリズムにおいて、通信できなかった 2 ノード間の線分上のすべてのセルに障害物があると判定するが、実際には線分上の一部のみが障害物である場合がほとんどであると考えられるため、通信したことにより障害物が存在しないと判定された場合の方が信頼度が高い。また、GPS ログを用いたアルゴリズムにおいても、障害物でないセルをノードが偶然訪れなかったため障害物であると判定される可能性があり、障害物が存在しないと判定された場合の方が信頼度が高い。このように、障害物が存在するという情報より障害物が存在しないという情報の方が信頼度が高いため、GPS ログを用いた推定と通信ログを用いた推定で結果が異なる場合は、障害物は存在しないと推定する。
- 通信ログを用いた推定において、障害物の有無が不明であると判定された場合は、GPS ログを用いた推定結果をそのまま利用する。

上記の手順で障害物の位置を推定し、その結果に基づいて作成された地図では、図 2 (d) の合成結果のように、障害物が歪んだ形で出力される場合が多い。これは、提案手法で想定するノードは救助活動に従事する人員であり、必ずしも障害物の境界に沿って移動するとは限らないためである。また、通信ログや GPS ログに含まれる位置には誤差が含まれており、仮にノードが障害物の境界に沿って移動した場合であっても、GPS によって得られた移動軌跡は直線とはならないためである。そこで、提案手法では対象領域内の障害物の形状がビルなどのような四角形である場合に、障害物の形状の歪みを除去する処理（四角形近似

処理）を行うことで、より可読性の高い地図を得ることを考える。はじめに、ハフ変換などを用いて障害物を構成する直線の方向を検出し、障害物を構成するすべての直線の方向がセルの縦横方向と同じであるかどうかを確認する。これは、障害物がセルの縦横方向と異なる直線や曲線や構成されている場合、四角形近似処理を行うことによって、かえって誤差が悪化する可能性があるためである。条件を満たしている場合は、隣接の列または行を比較することにより同じ障害物であると考えられるセル集合を生成し、セル集合ごとに境界を直線化することにより四角形近似処理を行う。具体的には、以下の手順で行う。まず、列ごとに同じ障害物を表していると思われるセルで 1 つのセル集合を形成する。ここでは、障害物と判定されたあるセルに対し、前後 3 m 以内に障害物と判定されたセルが存在する場合、それらのセルが同じ障害物を表しているとして判定する。次に、ある列におけるセル集合と隣接する列におけるセル集合を比較し、それぞれの集合を構成するセルのうち同じ行のセルが存在し、なおかつセル集合の列方向の長さの差が 8 m 以下の場合には、それらの 2 つのセル集合が同じ障害物を表しているとして判定し、統合する。最後に、得られた各セル集合に対し、集合を構成する行方向ならびに列方向のセル数がすべて等しくなるように、障害物と判定するセルの平均化を行う。この処理により、図 2 (e) のように、可読性の高い地図を生成する。

#### 5. シミュレーション実験による性能評価

提案手法の性能を無線ネットワークシミュレータ Qualnet<sup>15)</sup> を用いて評価した。ビルなどが複雑な形状を形成している環境で評価するために、150 m × 190 m の大阪大学歯学部領域（図 9）をモデルとしたマップ（図 10）を利用し、障害物の位置推定精度ならびに、現場地図の再現性を評価する。各ノードは、なるべく領域内全域を巡回するように、線分で示される通路上を移動し、通路が交差する点では後方以外の方向をランダムに再選択するモビリティモデルに従うものとする。なお、通路の幅は広い部分で約 10 m、狭い部分で約 2 m である。ノードの移動速度は平均 1.5 m/s、分散  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$  の正規分布に従うものとする。また、より現実に近い電波伝搬シミュレーションを実現するため、Wireless InSite<sup>16)</sup> モジュールを利用した。無線通信デバイスの周波数帯は 2.4 GHz 帯とし、各ノードの送信電力は、平面大地反射モデル<sup>12)</sup> における見通し通信時の最大通信距離が  $R_{max}$  となるように与えた。ノードの通信プロトコルは IEEE802.11b とする。Qualnet では受信電波強度がある一定の閾値以上となった場合に通信が行われるため、ノード間の距離が  $R_{max}$  以上となる場合においても、反射や回折によって生じたマルチパスによって受信電波強度が増幅され、通信が行われたと判定される可能性がある。ノードが GPS で取得した位置に含まれる





図 9 実験環境の鳥瞰写真  
Fig. 9 Picture of the region.

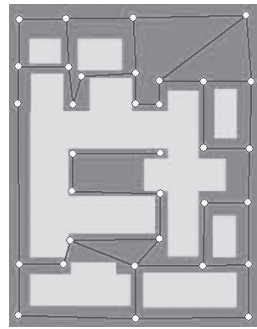


図 10 実験環境をモデル化したマップ  
Fig. 10 Obstacles in simulation.

表 2 パラメータ設定  
Table 2 Simulation settings.

最大通信距離 ( $R_{max}$ )	25, 50, 75 (m)
ノード数	15, 30, 45
ビーコンメッセージの送信周期 ( $T_c$ )	1.0, 5.0, 10.0 (s)
測位した位置の平均誤差 ( $\mu$ )	0, 5.0, 10.0 (m)

誤差は、平均  $\mu$  m, 分散  $1\text{ m}^2$  の正規分布に従うものとする。領域を  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  のセルに分割し、それぞれのセルが障害物かどうかを判定する。通信ログを用いた推定手法で用いるノード間最大通信距離  $R$  は前述の  $R_{max}$  に等しいものとする。GPS の測位周期  $T_p$  は 1 秒とし、測位やビーコンメッセージの送信タイミングはノード間で同期しているものとする（ただし、CSMA/CA により実際にメッセージが送信されるタイミングはノードによればらつきがある）。その他のパラメータは表 2 のように設定する（各パラメータ内の太字で表される数値をデフォルト値として用いる）。

以上の環境で、600 秒間に収集される GPS ログと通信ログを用いて地図を生成し、2 つの項目について評価した。1 つ目の評価項目として、式 (5) で示される全セルの障害物の有無の判定結果の正答率 ( $Hit$ ) を用いる。

$$Hit = \frac{1}{mn} \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^n hit(g_{a,b}) \quad (5)$$

表 3 各アルゴリズムの性能  
Table 3 Performance of each procedure.

	正答率	通路認識率
GPS ログからの推定結果 (クロージング適用前)	0.57	—
GPS ログからの推定結果 (クロージング適用後)	0.60	0.93
通信ログからの推定結果	0.75	0.93
合成後の推定結果 (四角形近似処理適用前)	0.87	0.95
合成後の推定結果 (四角形近似処理適用後)	0.89	0.95
クロージングを適用せずに合成した場合の推定結果 (四角形近似処理適用前)	0.85	0.78

ただし  $m, n$  は対象領域の  $x$  方向,  $y$  方向のセル分割数,  $hit(g_{a,b})$  はセル  $g_{a,b}$  における障害物の有無の推定結果が一致した場合に 1 を、一致しなかった場合に 0 を返す関数とする。2 つ目の評価項目として、すべての通路のうち生成された地図から認識できる通路の割合を表す、通路認識率を用いる。

### 5.1 提案手法の特性評価

本節では、提案手法のアルゴリズムを構成する、GPS ログを用いた推定手法、通信ログを用いた推定手法および推定結果の合成が提案手法の性能にどの程度寄与しているかを評価する。評価環境は前節と同じ図 9 で示す領域とし、各パラメータは表 2 で太字で示すデフォルト値とした環境で評価した。はじめに、提案手法における各アルゴリズムと正答率および通路認識率の値を表 3 に示す。評価結果より、GPS ログと通信ログを併用した場合、一方の情報しか用いない場合に比べて、正答率および通路認識率の値がともに向上していることが分かる。また、GPS ログからの推定結果では、クロージングを適用することにより正答率が向上していることが分かる。クロージングを適用した後に通信ログからの推定結果と合成した場合、クロージングを適用せずに通信ログからの推定結果と合成した場合と比べて通路認識率が大幅に向上している。このことから、通信ログからの推定結果だけでは認識できない通路を、クロージングにより正しく認識できていることが分かる。さらに四角形近似処理を適用することにより、正答率が向上していることが分かる。

次に、図 11 に、提案手法において GPS ログのみを利用した場合、通信ログのみを利用した場合、GPS ログと通信ログを併用した場合における、ログの収集時間に対する正答率の値を示す。評価結果より、GPS ログと通信ログを併用した場合、約 350 秒で正答率が 0.85 と高い値で収束したことが分かる。また、GPS ログと通信ログを併用した場合、一方の情報しか用いない場合に比べて正答率の収束が速いことが分かる。GPS ログのみを用いた場

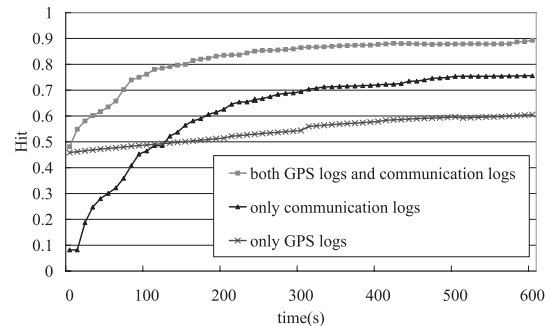


図 11 ログ収集時間と正答率の関係  
Fig. 11 Hit for log acquisition time.

合、ノードが移動可能領域を通過するにつれて正答率は徐々に上昇するが、ノードの移動速度には限界があるため正答率が上昇するまでに時間を要する。また、通信ログのみを用いた場合、ノードの通信範囲内のセルを対象に処理を行うので、GPS ログのみを用いた場合に比べて正答率の収束は速いが、2つのログ情報を併用した場合に比べて正答率は低い。

以上より、提案手法では、GPS ログと通信ログを併用することで、一方のログのみを用いるよりも高精度かつ高速に障害物の位置および形状を推定している。

## 5.2 基本性能の評価

本節では、提案手法の推定精度や各パラメータが推定精度に与える影響を評価する。提案手法の性能は、クロージングおよび四角形近似処理を適用した場合の性能とする。パラメータの設定は、ある1つのパラメータを表2に示した値で変化させ、他のパラメータは太字で示すデフォルト値を用いた。

### 5.2.1 ノードの最大通信距離

最大通信距離  $R_{max}$  が 25 m、50 m および 75 m の場合におけるログ収集時間に対する正答率  $Hit$  の値を図12に示す。また、600秒間のログを用いた場合の推定結果を図13に示す。最大通信距離  $R_{max}$  が 25 m、50 m および 75 m の場合における600秒間のログを用いた場合の正答率は 0.91、0.89、0.86 となり、通路認識率は 0.98、0.95、0.90 となった。よって、最大無線距離が小さいほど最終的に得られる推定結果の精度が良いことが分かる。提案手法では、2ノード間の距離が最大通信距離以内にもかかわらず通信が行われなかった場合、2ノード間の直線上のすべてのセルに障害物があると推定する。しかし、実際には、ほとんどの場合において直線上の一部のみが障害物であるため、無線距離が大きくなるほど、

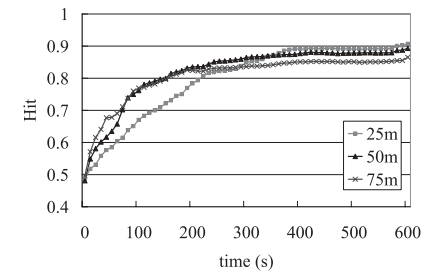


図 12 最大通信距離に対する推定精度の変化  
Fig. 12 Impact of  $R_{max}$ .

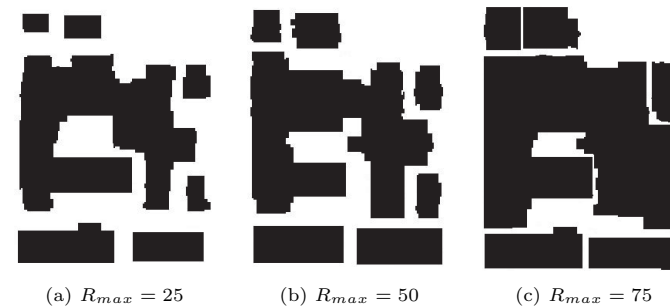


図 13 最大通信距離に対する推定結果  
Fig. 13 Generated maps under different  $R_{max}$  values.

障害物と誤判定されるセルが増加する。このため、無線距離が大きくなるにつれて、精度が悪化する傾向にあると考えられる。

### 5.2.2 ノードの平均位置誤差

ノードの位置情報はGPSログ、通信ログを用いた推定手法の両方で利用するため、提案手法の推定精度に大きな影響を与えることが予想される。GPSにより取得した位置誤差の平均  $\mu$  が 0 m、5 m および 10 m の場合におけるログ収集時間に対する正答率  $Hit$  の値を図14に示す。また、600秒間のログを用いた場合の推定結果を図15に示す。位置誤差の平均  $\mu$  が 0 m、5 m および 10 m の場合における600秒間のログを用いた場合の正答率は 0.91、0.89、0.84、通路認識率は 1.0、0.95、0.85 となり、位置誤差の平均が大きいくほど精度が悪化していることが分かる。しかし、誤差 10 m の場合でも8割以上の通路を認識でき

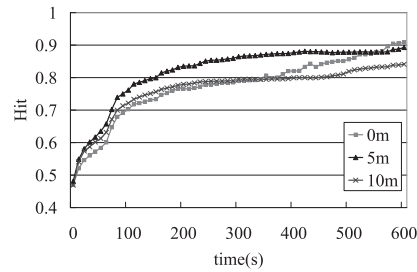


図 14 平均位置誤差に対する推定精度の変化  
Fig. 14 Impact of average position error  $\mu$ .

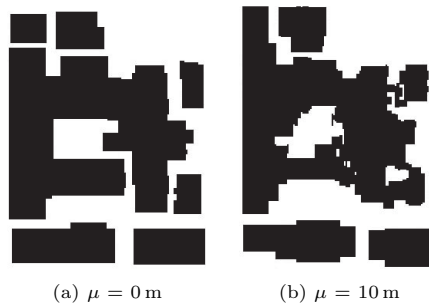


図 15 平均位置誤差に対する推定結果  
Fig. 15 Generated maps under different position errors.

ていることが分かる。

### 5.2.3 ノード数

ノード数が 15, 30 および 45 である場合において, ログの収集時間に対する正答率  $Hit$  の値を図 16 に示す. 図 16 より, ノード数が多いほど短い時間で正答率が 0.9 に収束する. これは, ノードが多数存在する場合, GPS ログや通信ログを多く得ることができ, 障害物の有無に関する情報が増加するためと考えられる.

### 5.2.4 ビーコンメッセージの送信周期

ビーコンメッセージの送信周期  $T_c$  が 1 秒, 5 秒および 10 秒の場合において, ログの収集時間に対する正答率  $Hit$  の値を図 17 で示す. 図 17 より, 送信周期が長いほど, 各時刻における推定精度が悪化しているが, これは送信周期が長くなるほど得られる通信ログが少な

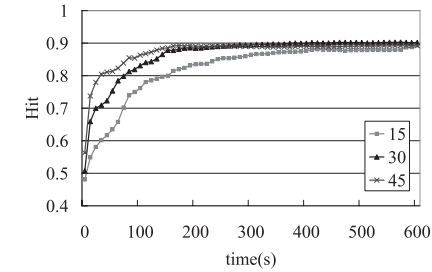


図 16 ノード数に対する推定精度の変化  
Fig. 16 Impact of the number of nodes.

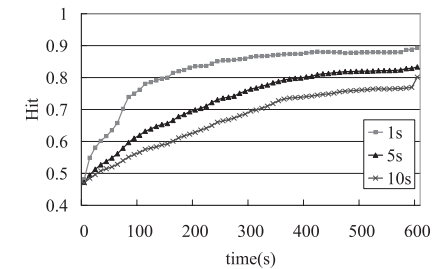


図 17 送信周期に対する推定精度の変化  
Fig. 17 Impact of beacon message interval  $T_c$ .

くなるためであると考えられる. しかし, 送信周期が 10 秒の場合でも最終的に得られる推定結果の正答率は 0.8 以上であり, 精度の悪化を抑えつつ通信量を減少させているといえる.

一般に, ナビゲーションシステムでは 1 秒に 1 回程度 GPS 測位を行っているものも多く, これと同期して送信すれば 1 秒間隔が妥当である. 災害現場に展開するノード数と領域面積からその密度を考慮しても, 1 秒に 1 回という送信頻度でパケット衝突が生じる確率は低い. したがって, 10 秒間隔という設定はかなり長いといえるが, そのような環境でもある程度の正答率を示していることが分かる.

## 6. 実機実験による性能評価

提案手法が実環境で有用であることを示すために, 実機を用いて通信ログおよび GPS ログを収集し, それらのログを用いて提案手法の性能評価を行った. 5 章のシミュレーション

表 4 通信ログの分析

Table 4 Analysis of communicatino logs.

実環境	シミュレーション	
	通信可能	通信不可能
通信可能	91.1 (%)	6.4 (%)
通信不可能	8.8 (%)	93.6 (%)

表 5 GPS ログの分析

Table 5 Analysis of GPS logs.

位置誤差 (m)	修正前の結果	修正後の結果
0 - 5 m	4,742	4,853
5 - 10 m	1,996	2,191
10 - 15 m	948	1,106
15 - 20 m	605	627
20 - 25 m	361	201
25 - 30 m	150	7
30 - 35 m	82	0
35 - 40 m	49	0
40 - 45 m	6	0
45 - 50 m	1	0
50 - m	45	0

実験と同様に、図 9 に示すような 150 m × 190 m 領域の大阪大学歯学部を対象とした。ノードは、Jennic 社製の JN5139<sup>11)</sup> と I-O DATA 社製の GPS レシーバ、USBGPS2<sup>17)</sup> を保持する歩行者とする。JN5139 は 2.4 GHz 帯を使用する IEEE802.15.4 により通信を行う。送信電力は -18 dBm に設定した。ノードは道路上を移動し、交差点で後方以外の方向をランダムに再選択するモビリティに従うものとした。なお、ノードの移動速度は 1.5 m/s とした。また、ノードがビーコンメッセージを送る周期  $T_c$  および GPS で位置を測定する周期  $T_p$  は 1 秒とした。上記の環境において、600 秒間の通信ログと GPS ログを収集した。

はじめに、実機で得られた通信ログおよび GPS ログと、5 章のシミュレーション実験で利用したログとを比較した。まず、表 4 に、ノード間距離が  $R$  以下の場合において、シミュレーションと実環境における通信の成否の関係を示す。シミュレーションと実環境における通信の成否は約 90% 一致している。このことから、無線伝播に影響を与える様々な要因によって、シミュレーションで用いた通信モデルに対し約 10% 乖離していることが分かる。次に、表 5 の「修正前の結果」に GPS で取得したノードの位置誤差の分布を示す。取得した位置の約半数が 5 m 以内の誤差である一方、一部の位置は 50 m 以上と非常に大きな誤差を

含むことが分かった。このため、実際の環境で得られた GPS ログには、シミュレーションで想定しているよりも大きな誤差が含まれており、提案手法の精度が悪化することが予想される。

そこで、実際の環境で提案手法を用いる場合には、あらかじめ誤差が大きいと思われる GPS の位置を修正した GPS ログを用いることを考える。GPS によって取得された位置の誤差が極端に大きくなる原因は、建物などの障害物の影響により、十分な数の衛星をとらえられなかったり、マルチパスが生じたりするためである。このため、極端に大きな位置誤差は高い障害物の付近など局所的な誤差であると考えられ、前後の測位位置から大きく離れている可能性が高い。このため、GPS ログの修正方法として、各測位位置に対して前後の位置からある閾値以上離れている場合、その位置を誤差の大きい位置と判定し、前後の位置（前後の位置が誤差が大きい位置と判定されている場合は、直近の位置のうち誤差が大きいと判定されていない位置）から線形補完した値で置き換えることを考える。なお、閾値はノードの移動速度を考慮し 20 m とする。修正後の位置誤差を表 5 の「修正後の結果」に示す。このとき、位置誤差の平均は 6.33 m である。結果より、明らかに誤差が大きいと思われる位置を修正できていることが分かる。

実機実験で得られた通信ログおよび修正後の GPS ログを用いて、提案手法の性能を評価した。提案手法の性能は、クロージングおよび四角形近似処理を適用した場合の性能とする。提案手法のパラメータの値は、5 章のシミュレーション実験で用いた値と同じとした。提案手法におけるノードの最大無線距離  $R_{max}$  は 50 m、セルサイズを 1 m とした。上記のパラメータ設定における提案手法の性能を、5 章で用いた正答率  $Hit$  および通路認識率により評価した。推定結果を図 18 (a) に示す。このとき、正答率は 0.86、通路認識率は 0.93 となった。まったく同じ環境を想定したシミュレーションでは、正答率は 0.89、通路認識率は 0.95 であり、シミュレーションと非常に近い結果が得られることが分かった。このことから、提案手法では通信ログを用いた推定における障害物判定の確率の利用により、シミュレーションで用いた通信ログと、実機実験で得られた通信ログとの乖離が地図精度に与える影響を小さくしていることが分かる。一方で、実機実験で得られた通信ログおよび修正前の GPS ログを利用した場合の推定結果は図 18 (b) のようになった。このとき正答率は 0.77、通路認識率は 0.82 であり、修正後の GPS ログを利用した場合の推定結果と比べて、精度が悪化することが確認された。これらの結果から、位置情報の精度が提案手法における地図の推定精度に与える影響は非常に大きい。簡単な補正アルゴリズムを用いて誤差の大きな位置を修正することにより、実環境においてもシミュレーション実験の結果に近い精度で地



(a) corrected GPS logs. (b) native GPS logs.  
 図 18 GPS で取得した位置情報の修正前後の推定結果  
 Fig. 18 Generated maps.

図を生成できることが分かった。

## 7. 考 察

本章では、提案手法の有効な適用領域について考察する。提案手法は、通信ログおよび GPS ログに基づき障害物を推定するため、通信ログや GPS ログがほとんど得られなかった領域の障害物を推定することはできない。よって、ノードが対象領域内の一部のみを移動するなど、偏って移動するような場合における障害物の推定には適さないと考えられる。また、実際の災害現場では、建物の倒壊によって流出した瓦礫など、端末間で通信できるが、人が移動できないような領域が存在することが考えられるが、提案手法では、通信ログと GPS ログそれぞれから障害物として推定された領域のみを障害物として推定するため、そのような領域を障害物として推定できない。このような領域を推定する方法として、GPS ログを用いてノードが最短経路を通らずに迂回した領域を推定し、障害物と見なす方法が考えられるが、ノードは必ずしも最短経路を通るとは限らない。そこで、障害物の有無ではなく、障害物の存在確率や種類として表現することを考える。たとえば、図 19 に示すように、ノードが互いに通信しなかった領域とノードが移動しなかった領域の違いを異なる色で表示することが考えられる。

一方で、ノードが領域内を満遍なく移動する場合、必要となるログの収集時間が異なるものの、障害物の配置、形状や道路の配置に影響されることなく障害物を推定できると考えられる。ここで、提案手法の推定精度とログの収集時間の関係を検討する。一般に領域の大きさが同じ場合、推定精度は得られた通信ログおよび GPS ログの数に依存すると考えられ



図 19 異なる色を用いた地図の表示  
 Fig. 19 Generated map with different colors.

る。たとえば通信ログを用いた推定の場合、ノード間の通信回数が多いほど高精度に、また高速に障害物の位置や形状を推定できると考えられる。図 12 では最大通信距離が 25 m, 50 m, 75 m の場合において、ログの収集時間に対する推定精度  $Hit$  の値を示したが、通信距離にかかわらずいずれの場合でも約 300 秒で推定精度が収束している。この 300 秒間に発生した通信回数はおよそ 4,000 回である。このようなログ収集時間に影響を与える項目として、送信周期、ノード数およびノードの移動速度などがあげられる。5 章の性能評価より、150 m × 190 m の領域において、ノード数  $N$ 、メッセージ送信間隔  $T_p$  に対し、正答率 0.8 以上の地図を達成するためのログの収集時間  $T_{max}$  は以下の式を満たす必要がある（ノードの移動速度が約 1.5 m/s とする）。

$$T_{max} \geq 150 \times \frac{15}{N} \times \left( \frac{1}{3} T_c + \frac{2}{3} \right) \quad (6)$$

また、領域の大きさが大きいほど、同じ推定精度を達成するためのログ収集時間も長くなると考えられる。いくつかのシミュレーションにより、領域の大きさとログの収集時間の関係性を評価したところ、領域の面積が  $x$  倍となると、同じ推定精度を達成するためのログ収集時間は  $x$  倍となることが分かった。

以上より提案手法は、災害現場などにおいて、障害物の境界に沿って移動したり、測距デバイスを障害物に向けたりするなど、医療関係者による測定のための行為を必要とすることなく、医療関係者が定期的な測位とメッセージ送信をしながら対象領域内を移動することで、領域の地図の自動生成が可能である。また、たとえば 15 人の医療関係者が 150 m × 190 m の領域内を、ビーコンメッセージを 1 秒間隔で送信しながら、速度 1.5 m/s で移動した場合、約 150 秒間に収集されたログのみを用いて、推定精度 80% の地図を取得

できる．このことから，提案手法は災害現場などにおける領域の地図生成に対して有用であるといえる．

## 8. ま と め

本論文では，レンジセンサやカメラなどを仮定せず，端末が保持するアドホック通信機能と GPS 測位機能のみを利用した障害物推定手法を提案した．提案手法では，近隣端末とのアドホック通信履歴と自身の移動履歴それぞれから推定された障害物地図を合成し画像処理を適用することで，対象領域内の障害物の位置および形状を推定する．シミュレーションおよび実験による性能評価により，150 m × 190 m の対象領域において 15 人の歩行者が約 350 秒間収集した通信ログおよび GPS ログにより推定精度 85% 程度の障害物地図を生成できることが確認された．提案手法は測定のための意識的な行為を必要とすることなく，ある程度高精度かつ高速に対象領域の地図を生成できることから，災害現場などにおける地図生成に対して有用であるといえる．

1 章に述べたように，突発的な事故災害現場において，地理情報を把握することはきわめて重要であるとの指摘が医療関係者よりなされている．今後は，現在進行中のプロジェクトである電子トリアージシステム開発<sup>1)</sup>と連携し，提案手法を現場で活用するための課題検討と検証を続けていきたい．

## 参 考 文 献

- 1) 東野輝夫：災害時救命救急支援を目指した人間情報センシングシステム，独立行政法人科学技術振興機構（オンライン）．[http://www.sen.jst.go.jp/theme/theme\\_h19/Higashino.html](http://www.sen.jst.go.jp/theme/theme_h19/Higashino.html)
- 2) Gandhi, T. and Trivedi, M.M.: Pedestrian protection systems: Issues, survey and challenges, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.3, pp.413–430 (2007).
- 3) Polychronopoulos, A., Tsogas, M., Amditis, A.J. and Andreone, L.: Sensor fusion for predicting vehicles' path for collision avoidance systems, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.3, pp.549–562 (2007).
- 4) Rockl, M., Strang, T. and Kranz, M.: V2V communications in automotive multi-sensor multi-target tracking, *Proc. VTC-2008-Fall*, pp.1–5 (2008).
- 5) 関 晃仁，奥富正敏：道路面の抽出・姿勢推定をもとにした一般道路環境下におけるロバストな障害物検出，電子情報通信学会論文誌，Vol.J89-D, No.8, pp.1859–1868 (2006).
- 6) Fang, C.-Y., Chen, S.-W. and Fuh, C.-S.: Road-sign detection and tracking, *IEEE*

*Trans. Vehicular Technology*, Vol.52, No.5, pp.1329–1341 (2003).

- 7) Choset, H. and Nagatani, K.: Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): Toward exact localization without explicit localization, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.17, No.2, pp.125–137 (2001).
- 8) Durrant-Whyte, H. and Bailey, T.: Simultaneous localization and mapping: Part I, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol.13, No.2, pp.99–110 (2006).
- 9) Wang, Y., Gao, J. and Mitchell, J.S.B.: Boundary recognition in sensor networks by topological methods, *Proc. MobiCom 2006*, pp.122–133 (2006).
- 10) Funke, S.: Topological hole detection in wireless sensor networks and its applications, *Proc. 2005 Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing*, pp.44–53 (2005).
- 11) Jennic Ltd.: JN5139 IEEE802.15.4/JenNet Evaluation Kit (online). [http://www.jennic.com/products/development\\_kits/jn5139\\_ieee802154\\_jennet\\_evaluation\\_kit](http://www.jennic.com/products/development_kits/jn5139_ieee802154_jennet_evaluation_kit)
- 12) Parsons, J.D.: *The mobile radio propagation channel*, Wiley (1992).
- 13) Lee, W.C.Y.: *Mobile communications engineering*, McGraw-Hill Professional (1982).
- 14) Russ, J.C.: *The image processing handbook*, CRC press (2006).
- 15) Scalable Network Technologies: QualNet (online). <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>
- 16) Remcom: Wireless InSite (online). <http://www.remcom.com/wireless-insite>
- 17) I-O DATA INC.: USBGPS2 (online). <http://www.iodata.jp/product/mobile/gps/usbgps2/>

(平成 22 年 3 月 10 日受付)

(平成 22 年 7 月 26 日採録)



南本 真一（正会員）

平成 22 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了．現在，株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモに勤務．在学中はアドホックネットワークの応用に関する研究に従事．



藤井 彩恵 (学生会員)

平成 20 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程進学。平成 20 年より日本学術振興会特別研究員。アドホックネットワークやモバイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE Student Member。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授。博士(工学)。分散システムや通信プロトコルの設計および実装に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。平成 19 年 10 月より、独立行政法人科学技術振興機構, CREST, 研究代表者。博士(工学)。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member, 本会フェロー。