

モバイルノードを用いた建造物の位置および形状推定

藤井 彩 恵^{†1} 南 本 真 一^{†1}
山 口 弘 純^{†1,†2} 東 野 輝 夫^{†1,†2}

本稿では、モバイルノードが保持する無線アドホック通信機能と GPS 測位機能のみを利用して、対象領域内の障害物の位置や形状を自動で推定する手法を提案する。提案手法では、ノード間の無線通信履歴とノードの移動履歴からそれぞれ障害物が存在する領域を推定し、それらの結果を統合する。150m×190m 内に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機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。これにより、災害現場など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情報が利用できない環境においても、迅速かつ高精度に移動可能な領域を取得することができ、傷病者救助活動などに利用可能であることが示された。

Estimation of Positions and Shapes of Buildings using Mobile Nodes

SAE FUJII,^{†1} SHINICHI MINAMIMOTO,^{†1}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2} and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

In this paper, we propose a method to automatically estimate the presence and shapes of obstacles in a target area using GPS receivers and communication devices equipped with mobile terminals. Our method generates two local maps independently using the position information and wireless ad-hoc link information recorded by the terminals, and finally merges them to obtain a single map. The results from experiments have shown that our method could achieve certain accuracy within reasonable time.

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

1. はじめに

近年、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盛んに行われている。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ー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¹⁾。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。

このような災害システムでは、地理情報上に傷病者の情報を表示し、傷病者がどの建物のそばに居るのかなどを把握することにより、傷病者の位置を迅速に発見してスムーズな救命活動が行われることが望ましい。地理情報を取得す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が、都市部など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し、既存の電子地図が利用できない可能性が高い。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るが、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り、救命活動が最優先とされる災害現場には適さない。

これまでに、現場の地図を作成(障害物の位置を推定)する手法が様々な分野において研究されている。例えば ITS では、車両の安全走行や自律走行の支援を目的に、障害物の推定手法が研究されている²⁾⁻⁶⁾。モバイルロボット分野では、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下において、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を推定する手法が提案されている^{7),8)}。これらの研究では、赤外線やレーザーによるレンジセンサやカメラを用いた画像解析を仮定しており、デバイスを対象に向けるなど測定のための行為を行う必要があるため、本研究が対象とする人間に適用することは難しい。また、センサネットワーク分野では、ノード間の通信情報からノードが存在しない領域を推定する手法が提案されているが^{9),10)}、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り、設置のためのハードウェアコストや人的コストが問題となる。

本稿では、ノードの移動通信履歴から対象領域内の障害物の位置や形状を自動で推定する手法を提案する。我々は先行研究において、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保持するモバイルノードが対象領域内を歩き回る過程において蓄積した電波強度情報の履歴と、GPS によって測定した位置情報の履歴（移動履歴）を用いて、対象領域内の障害物の存在領域を自動で推定する手法を提案した¹¹⁾。しかし、障害物が多く密集する環境では、障害物や地面からの反射などの影響で、電波強度の値が不安定となり精度が悪化するなどの問題があった。提案手法では、電波強度の代わりに、どのノード間で通信が行われたかを表す通信履歴を用いて、通信履歴および移動履歴それぞれから障害物の存在領域を推定し、それらの結果を統合する。通信履歴から障害物の存在領域を推定する際には、無線通信の不確実性や GPS の誤差を考慮して推定するために、通信履歴から各位置ごとに通信成功率を計算し、事前に測定した回折通信や見通し通信におけるパケット到着率に基づきその位置に障害物が存在するかを推定する。また、移動履歴から障害物の存在領域を推定する際には、GPS の誤差の影響を軽減するために、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。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領域を対象に、15 人の移動を想定した実験を行った結果、約 350 秒で再現率 85% 程度の地図を生成できることを確認した。

2. 提案手法の概要

2.1 想定環境

提案手法では、ノードとして Zigbee や無線 LAN などの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と、GPS 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、ビルなどの障害物領域と道路などの移動可能領域から構成され、すべてのノードは移動可能領域上のみを移動するものとする。各ノード i は GPS を用いて自身の位置 p_i を T_p 秒毎に測定し、自身の ID i 、測位時刻 t から構成される組 (i, p_i, t) を記録する。この組を **GPS ログ**と呼ぶ。また、各ノードは T_c 秒毎に最新の位置を含むビーコンメッセージを周辺ノードにブロードキャスト送信する。ノード j がノード i からビーコンメッセージを受信した場合、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。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により単一の計算サーバへ送信する。これは、領域の何ヶ所かに基地局に設置し、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の方法により実現できる。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。

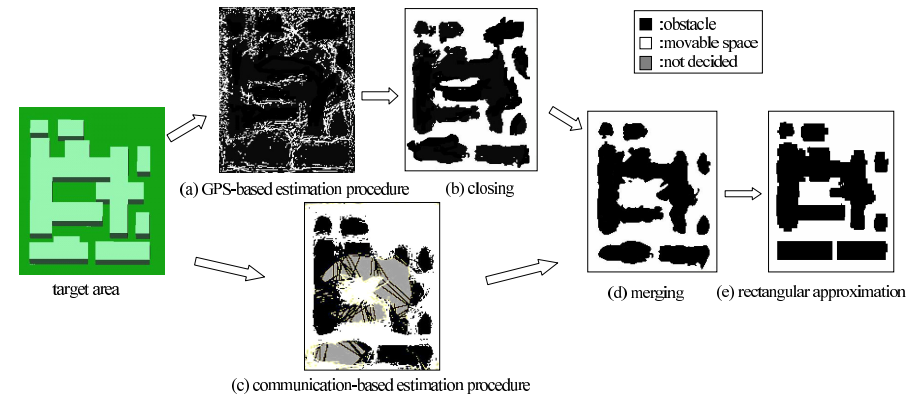


図 1 アルゴリズムの概要
 Fig. 1 Algorithm outline.

2.2 アルゴリズム設計

図 1 に提案手法のアルゴリズムの概要を示す。提案手法では、はじめに GPS ログおよび通信ログからそれぞれ障害物領域を推定する。GPS ログを用いた推定手法では、GPS ログに含まれる位置から移動可能領域を推定し（図 1(a)）、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 1(b)）。通信ログを用いた推定手法では、ノード間の位置関係とその際の通信状況から、障害物領域を推定する（図 1(c)）。これら 2 つの推定結果を合成し（図 1(d)）、障害物の形状の近似を行う（図 1(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。

2.2.1 GPS ログを用いた推定手法

本研究では、ノードは移動可能領域のみが存在すると仮定しているため、GPS により測定された位置に誤差が含まれない場合、各 GPS ログに含まれる位置および連続して測定された GPS ログの位置間を結ぶ線分上には障害物は存在しない。しかし、実環境において GPS で測定された位置には誤差が含まれる。そこで、ノードの訪問回数がある一定数以上の位置のみを移動可能領域と推定することで、障害物領域を移動可能領域と判定する可能性を軽減する。また、ノードが訪れていない領域については、移動可能領域であるにも関わらず障害物領域と推定されるため、クロージングと呼ばれる画像処理技術により移動可能領域を拡張する。これらの詳細は 3.1 節で述べる。

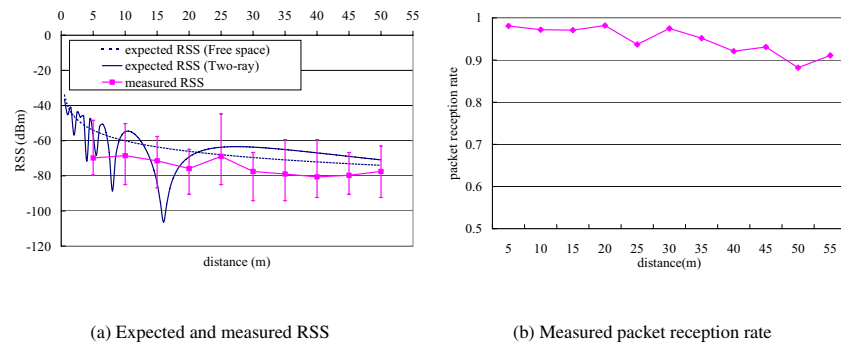


図2 距離に対する受信電波強度とパケット到達率の関係
 Fig.2 RSS and packet reception ratio (versus distance).

2.2.2 通信ログを用いた障害物推定

我々は文献[11]で、ノード間通信における受信電波強度 (RSS) を測定し、GPS で得られる 2 ノード間の距離と適当な伝播損失モデルとから導出される RSS 値 (理論値) と比較し、どの程度減衰しているかで 2 ノード間での障害物の有無を推定する手法を提案した。しかし、実環境では地面や建造物からの反射波が存在するマルチパス環境であるため、障害物以外の要因で受信電波強度が減衰したり、反対に増大する可能性があり、安定しないことが多い。この影響を検証するために、jennic 社製の JN5139 を用いて、見通しが良く周囲に建物が存在しない屋外のある 2 地点において JN5139 を地面から高さ 1m の位置に配置し、26 バイトの packets を計 10 回送信した際の受信電波強度の値を測定した。JN5139 は 2.4GHz 帯で IEEE802.15.4 規格により通信を行う無線通信端末であり、受信電波強度の閾値は -96dBm である。図 2(a) に送信電力を 0dBm とした場合の 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 2.4GHz 帯における自由空間 (free-space) 伝搬損失モデルでの値と、地面の反射係数 γ の値を -1 としたときの平面大地 (two-ray ground reflection) 伝搬損失モデルでの値を示す¹²⁾。実験結果より、実環境において観測された受信電波強度は、同じ距離でも非常に大きくなればつきが生じ、理論値と異なる値を取得する可能性があることがわかった。

そこで、提案手法では RSS 値の代わりに、2 ノード間に障害物が存在しないと仮定した場合に packets を受信すべき状況において、実際に測定した packets 到達率から障害物の

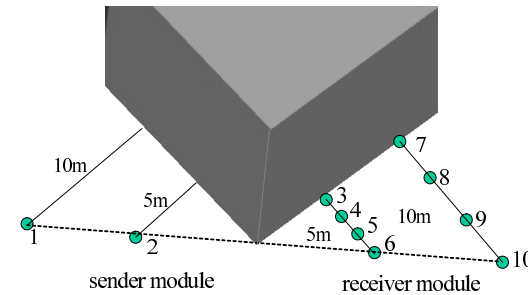


図3 回折実験の環境
 Fig.3 Diffraction propagation.

有無を推定することを考える。ある 2 ノードが互いに見通すことができ、かつノード間の距離が R 以内の場合のみ packets を受信できるという見通し距離通信モデルを想定した場合、次のようにノード間の障害物の有無を推定することができる、(1) 2 ノード間で通信が行われた場合ノード間に障害物が存在しない、(2) 2 ノード間の距離が R 以下であるにもかかわらず通信が行われなかった場合、ノード間に障害物が存在する。単純な推定方法として、見通し距離通信モデルに従って通信ログごとにノード間に障害物が存在するかどうか判定し、障害物が存在すると判定された回数が障害物が存在しないと判定された回数よりも多い位置を障害物領域と推定する方法が考えられる。しかし、実環境では次の 2 つの問題が考えられる、(a) 障害物や地面からの反射波による干渉によりノード間の距離が R 以下であるにもかかわらず通信が行われず、(b) ノード間に障害物が存在するにもかかわらず、障害物からの回折により通信が行われる。これらの問題を解決するため、提案手法では (a) および (b) が生じる確率を簡易実験により導出し、それらの確率も考慮して障害物が存在するかどうか判定する。

ここで実環境において (a) がどの程度生じるかを評価するために、jennic 社製の JN5139 を用いて、見通しが良く周囲に建物が存在しない屋外のある 2 地点において送信電力を -18dBm とした JN5139 を地面から高さ 1m の位置に配置し、26 バイトの packets を計 10 回送信した際の packets 到達率を測定した。なお、平面大地伝搬損失モデル¹²⁾ を仮定したとき、ノード間の距離が 50m 以下の場合 packets は到達する。図 2(b) に示す結果より、packets 到達率は 90% 以上であることがわかった。

同様に、実環境において (b) がどの程度生じるかを評価するために、図 3 に示すコンク

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

リート建造物の周辺において、地点 1 または 2 に配置したノードが送信電力 -18dBm で 10,000 パケットを送信した場合における地点 3~10 に配置したノードでのパケット到達率を測定した。このとき、ナイフエッジ回折モデル¹³⁾ では表 1 に示すようにノード間に障害物が存在する場合、受信電波強度の理論値が端末の受信電波強度の閾値 -96dBm より小さくなるため、回折による通信はほとんど生じない。一方、表 1 に示す各ノードで測定されたパケット到達率の実測値から、ノード間に障害物が存在する一部の場合において回折による通信が行われたことがわかった。提案手法では、(a) および (b) が生じる確率を考慮して障害物領域の推定を行う。これらの詳細は 3.2 節で述べる。

3. 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。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。

3.1 GPS ログを用いた推定手法

本節では、収集された GPS ログに基づき領域内の各セルが障害物かどうかを判定するアルゴリズムを記す (図 4)。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る、そのセルのノードの訪問回数を 1 増やす。また、あるノードが連続して測定した任意の GPS ログの組 $(i, p_i, t), (i, p'_i, t + T_p)$ に対し、線分 $p_i p'_i$ を含む各セルについても訪問回数を 1 増やす。最終的に得られた訪問回数が閾値 $thrs_{tra}$ 以上であればそのセルは障害物ではないと判定し、 $thrs_{tra}$ 未満であれば障害物が存在すると判定する。閾値 $thrs_{tra}$ は各セルをノードが訪問する回数の期待値とし、ノード数 N 、領域のサイズ $x \times y$ (m^2)、セル

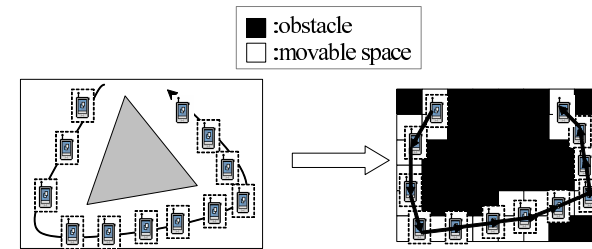


図 4 GPS ログを用いた推定例
 Fig. 4 GPS-based estimation procedure.

のサイズを g (m)、ログの収集時間を T (s)、ノードの平均速度を V (m/s) としたとき、 $gTVN/xy$ で定義される。

ここで、移動可能領域であってもノードによる訪問回数が $thrs_{tra}$ より小さいセルは、障害物領域として推定されるという問題が生じる。提案手法では、クロージング¹⁴⁾ という画像処理技術を適用し、周辺のセルの推定結果に基づき、移動可能領域であるにも関わらず障害物領域と判定されたセルを修正することにより解決する。以降、障害物が存在すると判定されたセルを黒、存在しない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) 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 4 以下のとき、 $g_{a,b}$ を黒に変更する。以上の処理をそれぞれ k 回ずつ行う (経験的に $k = 3$ とする)。

3.2 通信ログを用いた推定手法

本節では、収集された GPS ログに基づき領域内の各セルが障害物かどうかを判定するアルゴリズムを記す (図 5)。まずセル $g_{a,b}$ 毎に障害物と判定された回数 $T_{a,b}$ と障害物ではないと判定された回数 $F_{a,b}$ を保持し、それぞれ初期値を 0 とする。次に、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、通信可能な最大距離 R 以下である場合、対応する通信ログ (i, j, p_i, p_j, t) が存在するかを確認する。通信ログが存在する場合、線分 $p_i p_j$ を含む各セル $g_{a,b}$ に対し障害物が存在しないと判定し、 $F_{a,b}$ の値を 1 増やす。通信ログが存在しない場合は、線分 $p_i p_j$ を含む各セル $g_{a,b}$ に対し障害物が存在すると判定し、 $T_{a,b}$ の値を 1 増やす。最後に各セル $g_{a,b}$ が障害物であるかどうかを、 $T_{a,b}, F_{a,b}$ を用いて判定する。

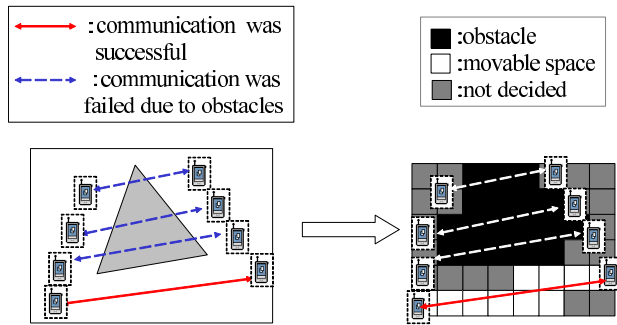


図 5 通信ログを用いた推定例
 Fig. 5 Communication-based estimation procedure.

ここで、2.2.2 節で述べたように、実際の環境では障害物や地面からの反射波による干渉によりノード間の距離が R 以下であるにも関わらず通信が行われないといった問題やノード間に障害物が存在するにも関わらず、障害物からの回折により通信が行われるといった問題が起こる可能性があるため、単純に $T_{a,b}$ と $F_{a,b}$ の値を比較するだけで障害物かどうか判定することは適切ではない。そこで、提案手法では 2.2.2 節の簡易実験から導出した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に基づき障害物かどうかを決定する。

あるセル上でノード間で通信が行われたという事象を A 、そのセル上に障害物があるという事象を B とする。 A 、 B が起こる確率をそれぞれ $P(A)$ 、 $P(B)$ とする。このとき、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。

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

あるセル上でノード間で通信が行われるという事象の確率は事前に分からないため、仮に $P(A)$ を $1/2$ とした場合、式 (1) は式 (2) のように展開できる。

$$P(B|A) = 2P(A|B)P(B) \quad (2)$$

式 (2) より、あるセル上で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は、事前確率 $P(B)$ の $2P(A|B)$ 倍となる。

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 (3) となり、あるセル上で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は、事前確率 $P(B)$ の $2P(\bar{A}|B)$ 倍となる。

$$P(B|\bar{A}) = 2P(\bar{A}|B)P(B) \quad (3)$$

提案手法では、セルに障害物が存在する確率 $P(B)$ の初期値を $1/2$ と考え、式 (4) のように、各セル $g_{a,b}$ における障害物の有無の判定回数 $T_{a,b}$ 、 $F_{a,b}$ に応じてこれらの変化量をそれぞれ乗じて得られる値 $p_{a,b}$ から各セルが障害物であるかを判定する。ここでは、 $p_{a,b}$ がある閾値以上であるとき、セル上に障害物があると判定する (閾値の値は経験的に 0.8 とする)。

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

2.2.2 節で行った実験結果からノード間に障害物が存在する場合、障害物からの回折により通信が行われた場合は少なかったため、あるセル上で障害物が存在する場合に通信が行われる確率 $P(A|B)$ を 0.1 とする。同様に、ノード間に障害物が存在しない場合、ノード間のパケット到達率は 90% 以上であり、障害物以外の要因で通信が行われなかった確率は小さいと考えられることから、あるセル上で障害物が存在しない場合に通信が行われる確率 $P(\bar{A}|B)$ を 0.9 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、障害物の有無は判定しない。

3.3 推定結果の合成

3.1 節、 3.2 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。

- 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 (存在しない) と判定された場合は、そのセルは障害物が存在する (存在しない) 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。これは、GPS ログを用いた推定および通信ログを用いた推定の両方において、障害物が存在しないと誤って判定されるよりも、障害物が存在すると誤って判定される可能性が高いためである。例えば通信ログを用いた推定においては、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可能性が高い。また、GPS ログを用いた推定においては、ノードがあまり訪問しなかったセルは移動可能領域であるにも関わらず障害物が存在すると判定される可能性がある。
- 通信ログを用いた推定において障害物の有無が判定されなかった場合は、GPS ログを用いた推定の結果を採用する。

上記の手順で推定された地図では、図 1(d) の合成結果のように、障害物が歪んだ形で出



図 6 実験環境の鳥瞰写真
Fig. 6 Picture of the region.

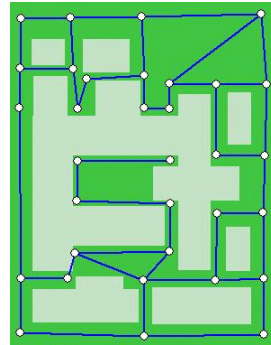


図 7 実験環境をモデル化したマップ
Fig.7 Obstacles in simulation.

力される場合が多い。このため、障害物の形状がビルなどのような四角形で構成されていると考えられる場合、障害物の歪みを除去する処理（四角形化処理）を行う。四角形化処理では同じ障害物であると考えられるセルごとに集合を形成し、それらの集合ごとに境界を直線化する。この処理により、図 1(e) のように、より可読性の高い地図を生成できる。

4. 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 Qualnet¹⁵⁾ 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、150m × 190m の大阪大学歯学部領域（図 6）をモデルとしたマップ（図 7）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できるように、線で示される通路を移動し、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。ノード数は 15 とし、ノードの移動速度は平均 1.5 m/s、分散 0.01 の正規分布に従うものとする。ノードの無線モデルは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 Insite¹⁶⁾ モジュールを利用した。各ノードの無線通信デバイスの周波数帯は 2.4 GHz 帯、ビーコンメッセージの送信周期 (T_c) は 1.0s、送信電力は、平面大地反射モデル¹²⁾ における最大通信距離が 50m となるように与えた。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 50m 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。ノードの GPS の測位周期

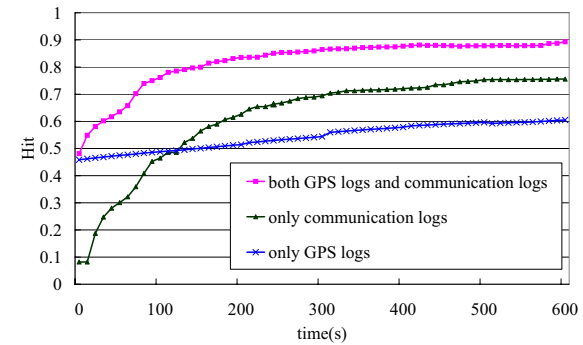


図 8 各アルゴリズムと推定精度の関係
Fig. 8 Performance of each procedure.

(T_p) は 1.0s し、取得した位置に含まれる誤差は、平均 5.0m、分散 1 の正規分布に従うものとする。また、提案手法における通信ログを用いた推定時に用いるノード間最大通信距離 R は 50m とし、セルのサイズは 1m とする。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する。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。

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

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。

提案手法における GPS ログを用いた推定アルゴリズムおよび通信ログを用いた推定アルゴリズムがそれぞれ正答率向上にどの程度寄与しているかを評価する。図 8 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推定精度 Hit 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、一方の情報しか用いない場合に比べて高精度であり、推定結果の収束も速いことがわかる。GPS ログのみを用いた場合、ノードが移動可能領域を通過するにつれて推定精度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推定精度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推定精度

表 2 通信ログの分析

Table 2 Analysis of communicatio 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 (%)

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得られる精度は低い。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、高精度かつ高速な障害物の位置および形状の推定を実現することができているといえる。

5. 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。4章のシミュレーション実験と同様に、図 6 に示すような 150m × 190m 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 と IO-DATA 社製の GPS、usbgps2 を保持する歩行者とし、ノード数は 15 とする。JN5139 は 2.4GHz 帯を使用する IEEE802.15.4 により通信を行う。送信電力は -18dBm に設定した。このとき、平面大地伝搬損失モデル¹²⁾ を仮定したとき、ノード間の距離が 50m 以下の場合パケットは到達する。ノードは道路上を速度は 1.5 m/s で移動し、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。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、4章のシミュレーション実験で利用したログと比較した。まず、表 2 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は 90% 以上一致しており、シミュレーションで使用した通信モデルは実環境に近かったことを示している。次に、図 9 の「native GPS」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 5m 以内の誤差である一方、建物に近い一部の位置は 50m 以上と非常に大きな誤差を含むことがわかった。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

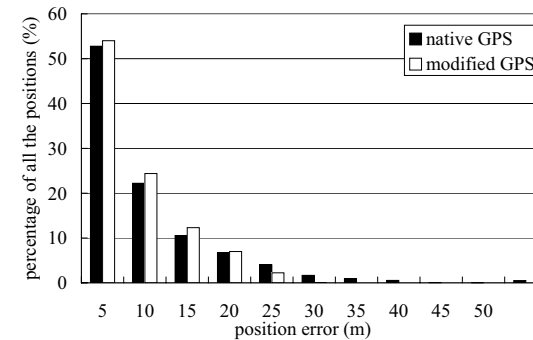


図 9 GPS ログの分析
Fig.9 Analysis of GPS logs

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、十分な数の衛星を捕らえられなかったり、マルチパスが生じるためである。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。そこで、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 20m とする。修正後の位置誤差を図 9 の「modified GPS」に示す。このとき、位置誤差の平均は 6.33m 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わかる。

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。提案手法のパラメータの値は、4章のシミュレーション実験で用いた値と同じとし、提案手法における通信ログを用いた推定時に用いるノード間最大通信距離 R は 50m、セルのサイズは 1m 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、地図の推定精度 Hit により評価した。推定結果を図 10(a) に示す。また、最終的に得られる推定結果の Hit の値は 0.86 となった。全く同じ環境を想定したシミュレーションでは、推定結果は図 10(b)、 Hit の値は 0.89 となり、実機実験で得られた結果がシミュレーションと非常に近いことがわかった。なお、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

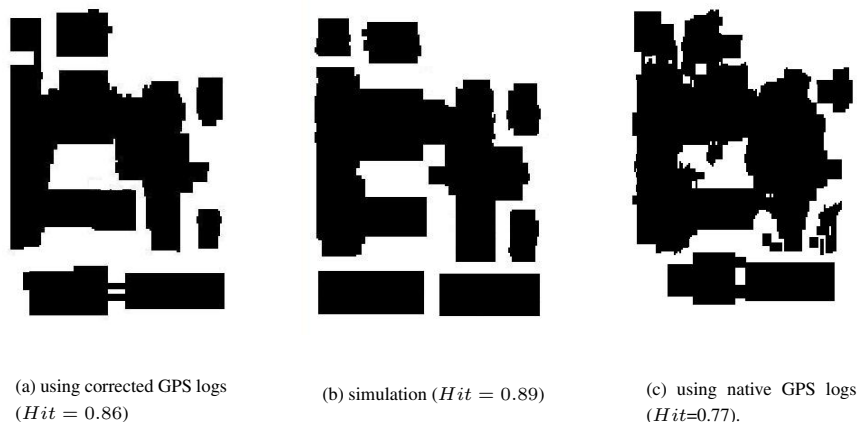


図 10 実験結果
Fig. 10 Experimental results.

推定結果は図 10(c), Hit の値は 0.77 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, 誤差が大きくなることが確認された. このことから, 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といえるが, 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く, 高い正答率で地図を生成できることがわかった.

6. まとめ

本稿では, 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高い精度で推定できる. シミュレーションおよび実機実験による性能評価により, 現実的な環境で再現率 85% 以上で障害物地図を生成できることがわかった. 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¹⁾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 (online), 入手先 (http://sen.jst.go.jp/theme/theme_h19/Higashino.html) (参照 2010-04-09).
- 2) Gandhi, T. and Trivedi, M.M.: Pedestrian protection systems: Issues, survey, and challenges, *IEEE Transactions on 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 Transactions on 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. of 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 Transactions on 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 Transactions on 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.99–108 (2006).
- 9) Wang, Y., Gao, J. and Mitchell, J. S.B.: Boundary recognition in sensor networks by topological methods, *Proc. of MobiCom 2006*, pp.122–133 (2006).
- 10) Funke, S.: Topological hole detection in wireless sensor networks and its applications, *Proc. of 2005 Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing*, pp.44–53 (2005).
- 11) 南本真一, 藤井彩恵, 山口弘純, 東野輝夫: 無線端末の移動通信履歴を用いた地図の自動生成, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム論文集, pp.901–912(2009).
- 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), available from (<http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>) (accessed 2010-04-09).
- 16) Remcom: Wireless InSite (online), available from (<http://www.remcom.com/wireless-insite>) (accessed 2010-04-09).
- 17) Minamimoto, S., Fujii, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Local map generation using position and communication history of mobile nodes, *Proc. of PerCom 2010*, pp.2–10 (2010).