# レーザレンジスキャナとモバイル端末を 活用した屋外地図推定

井ノ口 真樹<sup>1,a)</sup> 藤井 彩恵<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1,2</sup> 東野 輝夫<sup>1,2</sup>

#### 受付日 2011年10月24日, 採録日 2012年4月2日

概要:地震などの大規模災害における救助活動では,災害現場の環境を早急に正確に把握することが重要 となる.なかでも災害現場の地理情報は傷病者の救助,搬送を行ううえで必要不可欠である.これに対し, 救命チームの各人員が保持する端末の無線アドホック通信機能と GPS 測位機能を利用し,それらの端末 が移動しながら収集した位置情報や通信履歴を用いて対象領域の地図をリアルタイムに自動生成する手法 が開発されている.しかし,この手法では建物の詳細な形状を再現することが難しいことや地図生成時間 や精度に限界があることなどの課題があった.そこで本研究では,無線端末の位置情報や通信履歴に加え, 一部の人員が保持するレーザレンジスキャナ(LRS)から得られた障害物情報を利用し,高精度かつ短時 間で屋外地図を生成する手法を提案する.150m×190mの領域において提案手法のシミュレーションに よる性能評価を行った結果,15人のうちの3人がLRSを保持することにより200秒で約90%程度の精度 での地図生成を実現し,LRSを使用しない場合と比べ推定精度が90%に至る時間を約300秒短縮している ことを確認した.さらに,従来手法との性能比較により,提案手法の有用性を示している.

キーワード:地図推定,救助活動支援,レーザレンジスキャナ

# Outdoor Map Estimation by Using Laser Range Scanners and Moblie Terminals

INOKUCHI MASAKI<sup>1,a)</sup> SAE FUJII<sup>1</sup> HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>1,2</sup> TERUO HIGASHINO<sup>1,2</sup>

Received: October 24, 2011, Accepted: April 2, 2012

**Abstract:** In large-scale disasters such as earthquakes, it is important to grasp the situation of the disaster sites immediately for rescue operations and treatment actions. A research group has been working on the issue of obstacle map generation using GPS receivers and ad-hoc communication devices of mobile terminals. In the previous work, they have proposed a method to automatically generate a map by using position information from GPS and communication history. This study investigates the possibility of improving recognition accuracy and speed.

Keywords: map estimation, rescue activity support, laser range scanner

# 1. まえがき

地震などで短期間に多くの傷病者が発生するような災害

<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, Suita, Osaka 565–0871, Japan 現場における救命活動を ICT で支援する試みがなされて いる [1].

そのような現場における効率の良い救命活動のために は、災害現場の地理情報、特にビルや団地など建造物の地 図情報が必要不可欠である.しかし、私有地など詳細な地 図が存在しない場合や、建造物の倒壊などにより移動可能 な領域に大きな変化が生じている場合には既存の地図や航 空写真では対応できない.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST Japan Science and Technology Agency, CREST, Chiyoda, Tokyo 102-0076, Japan

<sup>&</sup>lt;sup>a)</sup> i-masaki@ist.osaka-u.ac.jp

このような背景に基づき、文献 [2], [3] では救命活動に従 事する人員が無線アドホック通信機能と GPS などの測位 機能のみを備えた一般的な無線端末(以下、ノードと呼ぶ) を保持しながら移動するだけで対象領域の地図を自動で生 成する手法が提案されている. この手法では、シミュレー ションや実機実験による性能評価結果より、地図生成のた めの測定などの意識的な行為を必要とすることなく、15人 で150m×190mの領域であれば、単位領域あたりの正答 率が 85%程度の地図を 350 秒程度で生成できることを示し ている.一方,無線通信の通信可否のみで障害物を推定す るため、建物の細部の形状を再現することが難しく、すべ ての障害物の形状を実質的に長方形として推定してしまう といった課題がある.また GPS の位置情報と通信履歴と いった比較的信頼度の低い情報源のみからの推定を行うた めに,確からしさの向上のためには情報量を増大させる必 要があり、そのためにより多くの人員による長時間の測定 を要するといった課題もあげられる.

近年,レーザレンジスキャナ(LRS)などを用いて取 得した周辺状況に関する情報を活用した技術がITSやロ ボット工学分野など様々な分野でさかんに研究されてい る[4],[5],[6],[7].LRSをノードに保持させることにより, ノードの周囲数メートルに存在する障害物の情報を1度の 測定で取得できるため,地図生成速度,精度の向上が期待 される.

そこで、本研究では文献 [2]、[3] の手法をもとに、ノード の位置情報や通信履歴に加えて、一部のノードが保持する LRS から得られた障害物情報を利用し、従来手法よりも高 精度かつ短時間で屋外地図を生成する手法を提案する.提 案手法では対象領域をセルに分割し, LRS からの障害物 情報と GPS の位置情報によりノード周辺のセルについて 障害物が存在するかを判定し、そのセルが障害物領域であ る尤度および移動可能な領域(移動領域)である尤度を算 出する. あわせて、ノードの通信履歴や、LRS を保持して いないノードの GPS の位置情報からも各セルの障害物尤 度,移動領域尤度を算出する.これらの尤度を用いて各セ ルが障害物領域か移動領域かを最終的に決定する.従来手 法では通信履歴を主体的に用いていたため、繰り返しノー ド間で通信を行い徐々に形を再現していたが、提案手法で は LRS を用いることによりノードの周囲の障害物の有無 を確実に判定することが可能となる. すなわち, 通信履歴 により比較的広い範囲のセルについて障害物であるかを大 まかに判定し、LRSのデータによりノード周辺のセルにつ いて通信履歴より高い精度で判定する. これらを組み合わ せることで,短時間で高い精度の地図生成が期待できる.

小規模な建造物が複数存在する領域をノードが巡回する ような環境を再現したシミュレーションにより、ノード数、 LRS を保持するノード数および GPS の誤差分布が、生成 された地図の正答率やその収束時間に与える影響を評価し

© 2012 Information Processing Society of Japan

た. その結果, 150 m×190 mの領域において15人のうち の3人がLRSを保持することにより200秒で約90%の精 度(正答率)での地図生成を実現し,誰もLRSを保持しな い場合と比べ精度が90%に至る時間を約300秒短縮してい ることを確認した.また,5人程度の少人数による地図生 成では,全員がLRSを保持することにより誰もLRSを保 持しない場合と比べ精度が10%以上高くなることを確認し た.さらに,先行研究では350秒で精度が約87%に収束す るのに対し提案手法は約200秒で90%を超える精度になっ た.このことから,提案手法がより短時間で高精度に障害 物を推定できることを確認した.また,様々な形状の建造 物についてもシミュレーションを行い,LRSを用いること でより詳細な形状を再現できることを確認した.

## 2. 関連研究

#### 2.1 周囲環境情報取得技術

画像やセンサによって取得した情報を用いて,物体の種 別や形状,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[4],近接して走行する他車両の 存在位置特定[8],[9],[10],標識認識[11]などの技術が研 究されている.

移動ロボットに関する分野では, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる手法 [5], [12] が知 られており,対象領域の地図を生成しながらロボットの位 置も同時に決定する. SLAM において LRS を用いる手法 も提案されており、複数のLRSを用いて3次元地図を生成 する手法 [13], LRS と超音波センサ, ステレオカメラなど を併用する手法 [6], [7] などが提案されている. これらの手 法の多くは、LRS が取得したデータ点群どうしをマッチン グさせる ICP アルゴリズム [14] などを用いて LRS の測定 データを統合する.しかし、そのためには、センサの位置 や向きを正確に把握し、高精度かつ高頻度で測定を行う必 要がある.移動ロボットではLRSを固定できるため、セン サの位置や向きを比較的高い精度で把握できるが,本研究 のように人間に測距デバイスを装着する際には、人間の姿 勢や向きにより測定時の角度、向きにばらつきが生じるた め,正確な測定データを連続して得ることが容易でない. このことから,提案手法では測定データが時間的に連続し ていなくても地図生成が可能となる方式を設計している.

#### 2.2 モバイルノードを用いた地図生成

本研究のもととなる文献 [2], [3] の地図生成手法につい て述べる.その処理概要を図1に示す.このアルゴリズ ムはまず,GPSの位置情報(GPSログ)および通信履歴 (通信ログ)それぞれから,障害物地図を生成する.障害



図 1 先行研究の処理概要 Fig. 1 Outline of the previous method.

物地図は、対象領域をセルに分割し各セルについて障害物 領域であるか移動領域であるかの情報を保持するものと する. GPS ログによる地図生成では、GPS ログから得ら れるノードの移動軌跡上のセルについて訪問数を増やし, 訪問数が一定値を超えたセルを移動領域、それ以外のセル を障害物領域とする(図1(a)). さらにその推測結果をク ロージング [15] と呼ばれる画像処理技術を用いて修正する (図1(b)). 通信ログによる地図生成では, 通信が成功した 2ノード間のセルを移動領域,最大通信距離内でありなが ら通信が失敗した2ノード間のセルを障害物領域として判 定し、各セルについて障害物領域と判定された回数、移動 領域として判定された回数によって重み付けされた確率か ら障害物領域か移動領域かを決定する(図1(c)).これら の結果を合成し(図1(d)),最後に障害物の四角形近似を 行う(図1(e))が、収束に時間を要したり、四角形近似を 適用できる建物の形状が限定されるといった課題がある. それに対し、本研究では GPS 付き無線端末のほかに一部 のノードが LRS を保持すると仮定したうえで、高速かつ 少人数での運用を可能とし、かつ様々な形状の建物に対応 可能な手法を提案する.

# 3. LRS を用いた地図生成手法

#### 3.1 想定環境

図2に提案手法の想定環境を示す.提案手法では、災害 現場においてGPS受信機および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を保持する救助人 員をノードとして想定する.また、一部のノードはLRS、 電子コンパスおよびジャイロセンサを保持する.LRS は 図3に示すように、LRS保持者が直立時に測定面が地面 に対し水平になるように取り付けられるものとする.

対象領域は屋外とし、建造物などの障害物領域と、道路 などの移動領域からなる。各ノード*i* は定期的に GPS を 用いて位置情報  $p_i$  を取得し、ノード ID ( $ID_i$  で表す) お よび取得時刻 t とともに (t,  $ID_i$ ,  $p_i$ )の組として記録する。



Fig. 2 Environment of the proposed method.



図 3 LRS の取り付け例 Fig. 3 Installation example of the LRS.

これを GPS ログと呼ぶ.また,GPSを用いて位置情報を 取得する時刻に同期して  $ID_i$  と直近に測定した位置情報  $p_i$ を周辺ノードへブロードキャストする.ノード i からの メッセージを受信したノード j は  $ID_j$ ,位置情報  $p_j$  および 受信時刻 t' とともに  $(t', ID_j, p_j, ID_i, p_i)$ の組として記録 する.これを通信ログと呼ぶ.さらに LRS を保持する各 ノード i は定期的に LRS を用いて図 4 に示すような自ら の位置  $p_i$ を中心とした半径  $r_L$ ,中心角  $\theta_L$ の扇形の範囲に おける自身と最も近い物体までの距離を,ある角度間隔  $\Delta \theta$ で取得する.なお,本稿では建物からのみレーザが反射す るものとし、 $r_L$  は市販の LRS の性能を考慮し十メートル 程度とする.このとき,ジャイロセンサを用いて LRS の傾 きを測定し,LRS の測定面が水平かどうかを確認し,水平 ではない状態で測定された情報は破棄する.また,電子コ ンパスにより LRS の方角を測定する. ノード *i* は LRS に よって取得した情報に基づき,方角  $\theta_k$  ( $k = 0, ..., \theta_L/\Delta \theta$ ) における自らの位置  $p_i$  から最も近い物体までの距離  $d_k$  を 測定し ( $d_k \leq r_L$ ),  $ID_i$ , 取得時刻 t'' および自らの位置情 報  $p_i$  とともに (t'',  $ID_i$ ,  $p_i$ ,  $\{\theta_k, d_k\}_{k=0,...,\theta_L/\Delta \theta}$ )の組とし て記録する. これを **LRS** データと呼ぶ. なお以降では簡 単のため,  $\{\theta_k, d_k\}_{k=0,...,\theta_L/\Delta \theta}$  を  $L_i$  で表す. メッセージ 受信時や LRS によるデータ測定時に自らの位置を測定し なかった場合は,前後の時刻に測定した位置情報から線形 補完した位置を用いる.

このように,各ノードは領域内の被災者の救助活動を行いつつ,GPS ログ,通信ログおよび LRS データを記録する.そして,記録された情報は基地局などを通じて単一のサーバへと集約される.サーバでは収集した情報を用いて障害物地図を作成する.

本稿では、サーバにおいて実行される障害物地図生成の ための集中型アルゴリズムを提案する.



図 4 LRS による測定 Fig. 4 Measurement with LRS.

#### 3.2 地図生成アルゴリズムの概要

提案手法では対象領域を等しい大きさの正方領域(セル) に分割し、各セルについて障害物領域または移動領域のい ずれであるかを決定する. セルの辺長をSとし、対象領域 をx方向にm 個、y方向にn 個に分割したときの各セル を  $\{A_{a,b}|1 \le a \le m, 1 \le b \le n\}$ で表す.

アルゴリズムの概要を図5に示す.ノードの移動軌跡お よび LRS データから障害物が存在する領域と存在しない 領域を推定できるため、GPS ログおよび LRS データから、 セル A<sub>a,b</sub> が障害物領域である尤度 Go<sub>a,b</sub> とセル A<sub>a,b</sub> が移 動領域である尤度 Gma,b をすべてのセルについて計算し, 障害物尤度地図 Go および移動領域尤度地図 Gm を作成す る (図 5(a)). 次に, ノード間の距離が通信可能距離以内 でありながら,通信が失敗している場合にはノード間に障 害物が存在すると考えられる.また,通信が成功している ノード間には障害物が存在しないと考えられる.このこと から、セル A<sub>a,b</sub> が障害物領域である尤度 Ro<sub>a,b</sub> と移動領域 である尤度 Rma,b をすべてのセルについて計算し,障害物 尤度地図 Ro および移動領域尤度地図 Rm をそれぞれ作成 する (図 5(b)). そして, 各セル A<sub>a,b</sub> の障害物尤度, 移動 領域尤度を正規化し、さらに、後述する方法で4種類の地 図をどの程度信頼するかの重み付けを行う. 各セルの4つ の尤度の重み付き線形和の大小に基づき、そのセルが障害 物領域であるか移動領域であるかを判定し、障害物地図を 得る (図 5(c)).

GPS の測定位置には誤差が含まれることや、障害物が



Fig. 5 Outline of the proposed method.

存在していなくても通信が失敗することがありえること, LRS では障害物の奥行き情報を取得できないことなどの理 由により,各セルが障害物領域であるか移動領域であるか を GPS,通信,LRS の1回の測定データから決定すること は難しい.そこで,提案手法では各セルについて障害物が 存在する確からしさ,移動領域である確からしさを,まず 尤度として算出する方法を採用している.また,一般に情 報源が異なれば得た情報の信頼性も異なると考えられるた め,これらの尤度を情報源(LRS や通信)ごとに独立して 算出し,最後に信頼性を考慮し統合するという方針をとる.

ここで, LRS データはノードの移動経路近辺の10メート ル以内といった比較的狭い範囲の情報を取得するが, LRS 自体は測距誤差がきわめて小さいため,その精度はGPS の精度に大きく依存し,GPSの精度が高いときにはGPS ログおよびLRS データから得られる尤度情報も非常に信 頼性が高くなる.一方,通信ログからは最大通信距離内で ある数十メートル程度の推定であり,障害物が存在してい ない場合も受信失敗が起こりうるなど,障害物の有無以外 の条件により通信状態が影響を受けるためその精度は低い と考えられる.このような情報源の特性から,GPSの誤差 などを考慮し重み付けを行う.また,同時に得られる4つ の尤度地図の尤度の平均値を用いて正規化を行う.

# 3.3 GPS ログおよびレーザレンジスキャナのデータを用 いた尤度地図生成手法

LRS は、ある角度における最も近い物体までの距離 を測定する、本稿では建物からのみレーザが反射する ことを想定しているため、各 LRS データ (t, ID<sub>i</sub>, p<sub>i</sub>,  $L_i = \{\theta_k, d_k\}_{k=0,...,\theta_L/\Delta\theta}$ )の方角  $\theta_k$  ごと、位置  $p_i$  から 距離  $d_k$  未満の範囲には障害物がなく、距離  $d_k$  には障害物 があると考えられる、一方で、距離  $d_k$  を超えて距離  $r_L$  (測 距限界距離) までの範囲は障害物かそうでないかは分から ない、しかし、一般的な建造物の大きさは数十メートルで あり、LRS の測定限界距離  $r_L$  よりも十分大きいと考えら れる、以上より、本稿では図 6 のように、各 LRS データ において位置  $p_i$  から方角  $\theta_k$  に対し距離  $d_k$  以内の範囲内 を移動領域とし、距離  $d_k$  から距離  $r_L$  までの範囲を障害物

> 障害物が存在するか 判定できない領域
>  ・障害物 ・障害物領域
>  ・移動領域
>  ・移動領域
>  ・移動領域
>  ・移動領域
>  ・移動領域
>  ・

図 6 LRS データを用いた移動領域および障害物領域の判定例

Fig. 6 Decision example of the movable area or obstacle area using LRS data.

領域である可能性が高いと見なす.このとき,障害物が薄い塀などであれば距離 $d_k$ から距離 $r_L$ までの範囲に移動領域が存在する可能性があり、生成する地図の精度に悪影響を及ぼしうる.しかし、時間の経過とともに、その領域についてもいずれかのノードにより得られるデータと組み合わせることで補正されると考えられる.

また,提案手法ではノードは障害物(建造物)以外を移 動すると仮定している.このため,GPSの測位間隔を $\Delta t$ としたとき,2つのGPSログ $(i, p_i, t)$ と $(i, p'_i, t + \Delta t)$ を 結ぶ線分上は移動領域である可能性が高いと見なす.

ここで、GPS で取得した位置には誤差が含まれるため、 LRS データによる判定は正解から GPS の誤差分だけずれ てしまう、そこで、提案手法では LRS データにより障害 物領域あるいは移動領域であると判定されたセルから距離 r<sub>R</sub>以内のセルに対しても、GPSの誤差を考慮した尤度の 更新を行う. 一般にノード i が GPS によって取得した位 置  $p_i$  が正しい確率は  $p_i$  がノードの正しい位置  $q_i$  に近い ほど高いと考えられる.本稿では GPS に含まれる x 方向 の位置誤差と y 方向の位置誤差は互いに独立でそれぞれ 平均 0, 分散  $\sigma_L^2$  の正規分布に従うものとし, これらの分 布の密度関数を f(x) で表す.また,正規分布では確率変 数が±3σ<sub>L</sub>以内となる確率が99.74%であるため、尤度更 新対象とするセルの範囲 r<sub>R</sub> を 3σ<sub>L</sub> とする.そして,セル A<sub>ab</sub>を障害物領域または移動領域であると判定した際に は、 $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R$  (S はセルの辺長) を満たす 各セル $A_{a',b'}$  $(a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b)$ について、その 障害物尤度 Goa',b' または移動領域尤度 Gma',b' に以下の 関数  $l(\Delta a, \Delta b)$  で定義される値を加算する.

$$l(\Delta a, \Delta b) = \int_{-\frac{S}{2}}^{\frac{S}{2}} \int_{-\frac{S}{2}}^{\frac{S}{2}} f(x + S\Delta a) f(y + S\Delta b) dx dy$$
<sup>(1)</sup>

以上の方法により,図7に示すように,LRS データに



図 7 LRS データによる尤度算出 Fig. 7 Calculation of the likelihood using LRS data.

より障害物領域または移動領域と判定したセルについて, 尤度の算出を行うことができる.このように算出した尤度 の情報を時間の経過とともに積み重ねることにより,GPS の誤差が軽減されていくことが期待される.

以下,提案手法における GPS ログおよび LRS データを 用いた尤度地図生成手法のアルゴリズムについて述べる. 各セル *A*<sub>*a,b*</sub> の障害物尤度 *Go*<sub>*a,b*</sub> および移動領域尤度 *Gm*<sub>*a,b*</sub> の初期値を 0 とする.

- (1) すべての LRS データ (t,  $ID_i$ ,  $p_i$ ,  $\{\theta_k, d_k\}_{k=0,...,\theta_L/\Delta\theta}$ ) に対し,  $p_i \ge p_i$  から方角  $\theta_k$  に距離  $d_k$  離れた位置  $p'_i$ を結ぶ線分上のすべてのセルを移動領域と判定する. また,  $p'_i \ge p_i$  から方角  $\theta_k$  に距離  $r_L$  離れた位置  $p''_i$  を 結ぶ線分上のすべてのセルを障害物領域と判定する. この処理をすべての k ( $k = 0, ..., \theta_L/\Delta\theta$ ) について 行う.
- (2) ノード *i* によって連続して記録された 2 つの GPS ロ グ (*i*, *p<sub>i</sub>*, *t*) と (*i*, *p'<sub>i</sub>*, *t'*) に対し, *p<sub>i</sub>* と *p'<sub>i</sub>* を結ぶ線分上 に存在するすべてのセルを移動領域と判定する.
- (3) 移動領域と判定されたセル $A_{a,b}$ に対し,  $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R を満たす,各セル$   $A_{a',b'}(a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b)$ について,移動領 域尤度 $Gm_{a',b'}$ に関数 $l(\Delta a, \Delta b)$ で計算される値を加 算する.
- (4) 障害物領域と判定されたセル  $A_{a,b}$  に対し,  $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R を満たす,各セル A_{a',b'}$   $(a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b)$  について,障害物尤度  $G_{a',b'}$ に関数  $l(\Delta a, \Delta b)$  で計算される値を加算する.

#### 3.4 通信ログを用いた尤度地図生成手法

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 r が最大通信距離 R 以内の場合のみメッセージを受 信できるという単純な通信モデルを想定した場合、以下の ようにノード間の障害物の有無を推定できる.(1)2ノー ド間でメッセージが送受信された場合、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メッセージ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,(t, ID<sub>i</sub>, p<sub>i</sub>, ID<sub>i</sub>, p<sub>i</sub>)が存在する場合には 線分 p<sub>i</sub>p<sub>i</sub> 上を移動領域と推定し,存在しない場合にはノー ド間の距離が R 以内であれば線分 pipi 上を障害物領域と 推定する.ただし,LRS データの場合と同様に,GPS の 誤差を考慮した尤度の更新を行う. さらに, 実際の環境で は、障害物によるマルチパスなどの要因で、受信可能な位 置関係の2ノード間でパケットロス(受信失敗)が生じ, 移動領域が障害物と判定されてしまう可能性がある。一般 にノード間の距離が長いほど、パケットロスの確率が高く なるため、距離に応じて障害物尤度を小さくすることが望 ましい. そこで,通信ログからセル Aab を障害物領域で



図8 通信ログによる2ノード間の尤度算出

Fig. 8 Calculation of the likelihood between two nodes using the communication log.

あると判定した際には、 $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R \epsilon$ 満た す、各セル $A_{a',b'}$  ( $a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b$ ) について、 関数 $l(\Delta a, \Delta b)$ で計算される値に対し、以下で与えられる ノード間距離rの関数p(r)を係数として乗じた値を障害物 尤度 $Go_{a',b'}$ に加算する.

$$p(r) = 1 - \frac{r}{R} \tag{2}$$

以上の方法により,図8に示すように,通信ログにより 障害物領域,移動領域として判定したセルについて,尤度 の算出を行うことができる.

以下,提案手法における通信ログを用いた尤度地図生成 手法のアルゴリズムについて述べる.各セル *A<sub>a,b</sub>* の障害 物尤度 *Ro<sub>a,b</sub>* および移動領域尤度 *Rm<sub>a,b</sub>* の初期値を 0 と する.

- (1)各通信ログ(t, ID<sub>i</sub>, p<sub>i</sub>, ID<sub>j</sub>, p<sub>j</sub>)に対し、線分 p<sub>i</sub>p<sub>j</sub>上のセルを移動領域と推定する.
- (2) (1) で移動領域と判定されたセル  $A_{a,b}$  に対し,  $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R$  を満たす,各セル  $A_{a',b'}$ ( $a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b$ ) について,移動領域 尤度  $Rm_{a',b'}$  に関数  $l(\Delta a, \Delta b)$  で計算される値を加算 する.
- (3) ノード間の距離が R 以下であり,通信ログが存在し ない場合には線分 p<sub>i</sub>p<sub>j</sub>上のセルを障害物領域と推定 する.
- (4) (3) で障害物領域と判定されたセル  $A_{a,b}$  に対し,  $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R を満たす,各セル A_{a',b'}$   $(a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b)$  について,障害物尤 度  $Ro_{a',b'}$ に関数  $l(\Delta a, \Delta b)$ で計算される値とノード間 の距離 r に対し関数 p(r)で計算される値の積を加算 する.

#### 3.5 尤度地図の統合法

ここまでで推定された2つの障害物尤度地図 Go および と Ro と2つの移動領域尤度地図 Gm および Rm を統合す ることで,時刻 t における障害物地図を得る.

障害物領域と移動領域の判定は各セルについて Go, Ro の障害物尤度と Gm, Rm の移動領域尤度を比較すること で行われる.ただし,地形やモビリティ,ノード密度など により,各尤度地図が取得する情報量に偏りがあるため, 各尤度地図の尤度値を正規化して比較すべきである.ま た,一般に各情報源の信頼性は異なることから,信頼性に 応じて各尤度地図を重み付けすべきである.そこで,各尤 度地図の正規化と信頼性に応じた重み付けを行う係数 wgo, wro, wgm, wrm を用いた以下の不等式 (3)により障害物 領域であるか移動領域であるかの判定を行う.不等式 (3) が真ならば障害物領域,偽ならば移動領域と判定する.

 $w_{go}Go_{a,b} + w_{ro}Ro_{a,b} \ge w_{gm}Gm_{a,b} + w_{rm}Rm_{a,b} \quad (3)$ 

なお、係数の決め方は 4.2 節で議論する.

## 4. シミュレーションによる性能評価

## 4.1 評価環境

提案手法の性能を無線ネットワークシミュレータ Qualnet [16] を用いて評価した.対象領域として大阪大学歯学部 (図 9) を抽象化した領域(図 10) を用いた.150m×190m の領域に複数の建造物が存在し複雑な地形となっている. ノードは図 10 中の線で表される経路上を移動し,交点で 後方以外の方向をランダムに選択するようなモビリティ



図 9 対象領域の航空写真 Fig. 9 Air photograph of target area.



図 10 シミュレーションマップ Fig. 10 Simulation map of target area.

に従って対象領域全域を巡回する. またノードの移動速度 は平均 1.5 m/s, 分散 0.01 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> の正規分布に従うものと し、初期位置は経路上に分散される.ノードが LRS を保 持する場合、ノードの進行方向を LRS の向きとし、半径  $r_L = 10 \,\mathrm{m}$ ,中心角 $\theta_L = 270^\circ$ の扇形を測距範囲として, 前述のモビリティによって得られる対象領域中の位置お よび進行方向からその周辺の障害物情報を LRS のデータ として与える.なお、LRSの測定誤差は一般に GPSの誤 差と比べ十分に小さいため、ここでは考慮しない.また、 平地における通常歩行では LRS が水平から大きく外れる ことは稀であるためシミュレーションでは LRS のデータ の破棄は行わない. さらに, 障害物を考慮したより現実に 近い電波伝搬シミュレーションを実現するため, Wireless InSite [17] 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 とし, 各ノードの送信電力は平面大地 反射モデル [18] における見通し通信時の最大通信距離が 50m となるように与えた. またノードの通信プロトコル は IEEE802.11b を使用した. さらに, GPS の位置情報に 含まれる誤差は平均0m, 分散 σ<sup>2</sup> m<sup>2</sup> の正規分布に従うも のとし、その測位周期は1秒とした.

以上の環境のもとで、地図生成におけるパラメータをそれぞれ設定し、性能評価を行う、領域を分割するセルの大きさは1m×1mとし、通信ログを用いた障害物尤度地図作成における最大通信距離 R は 50mとした. さらに尤度算出で用いる分布の標準偏差  $\sigma_L$  は  $\sqrt{2m}$  とした. ノード数 N, LRS を保持するノード数  $N_L$  ( $N_L \leq N$ ), GPS の誤差分布の標準偏差  $\sigma$  は評価項目ごとにそれぞれ設定する. ただし、それぞれ N = 15、  $N_L = 3$ 、  $\sigma = 4m$  をデフォルト値とし、特に言及がない場合はデフォルト値が設定されているものとする. また、3.5 節で述べた重み係数については次節で述べる方針で決定した値を用いた.

そのうえで,600 秒間シミュレーションを行い各時刻で 生成される障害物地図の正答率の時間変化で提案手法の性 能を評価する.ここで,正答率とは生成した地図の全セル 数に対し移動領域,障害物領域の推定が正しいセル数の割 合を指す.また,各セルの推定における初期値はすべて移 動領域とする.

#### 4.2 重み係数の設定

本節では 3.5 節で述べた重み係数の設定について述べる. 前節で述べたシミュレーション環境で簡単な実験を行った ところ,通信ログから得た障害物尤度の重み係数  $w_{ro}$  が地 図精度に与える影響は他の重み係数の影響と比べ非常に大 きく,他の重み係数を  $w_{go} = w_{gm} = w_{rm} = 1$  とし,  $w_{ro}$ を適切に定めてやれば,精度の高い地図を生成できること が確認された.以下, $w_{ro}$ の値の設定について述べる.

 $w_{go} = w_{gm} = w_{rm} = 1$ とし式 (3) を変形すると以下の 式 (4) が得られる.



図 11 パラメータsに対する $w_{ro}$ の最適値 Fig. 11 Relations between weight and paramaters.



図 12 GPS 誤差の標準偏差  $\sigma$  に対する  $w_{ro}$  の最適値 Fig. 12 Relations between weight and distribution of errors.

$$w_{ro} \ge \frac{Gm_{a,b} + Rm_{a,b} - Go_{a,b}}{Ro_{a,b}} \tag{4}$$

この式の右辺における各セルの尤度値に各尤度地図の平 均尤度値  $\mu_{go}$ ,  $\mu_{gm}$ ,  $\mu_{ro}$ ,  $\mu_{rm}$  を代入した以下の式 (5) で 定義されるパラメータ s を考える.

$$s = \frac{\mu_{gm} + \mu_{rm} - \mu_{go}}{\mu_{ro}} \tag{5}$$

このパラメータsが統合時の正規化係数となり,重み係数 $w_{ro}$ はsに依存して変化すると考えられる.このことを確かめるため、障害物領域であるか移動領域であるかの判定が全体として最も正しくなるような $w_{ro}$ の値とそのときのパラメータsとの関係を前述の環境で評価した.その結果、図 11 に示されるように最適な重み係数 $w_{ro}$ はパラメータsにほぼ比例することが分かった.

一方,各尤度地図の信頼性は GPS の誤差分布の標準偏 差  $\sigma$  に大きく依存すると考えられるため,重み係数  $w_{ro}$  の 値もそれらの要因による影響を受けると考えられる.そこ で,GPS の誤差分布の標準偏差  $\sigma$  に対する最適な重み係数  $w_{ro}$  の値の関係を調べたところ図 12 に示されるように, GPS の誤差分布の標準偏差  $\sigma$  と  $w_{ro}$  の最適な値はほぼ比 例することが分かった.

以上より,重み係数  $w_{ro} \epsilon r \beta \neq - \beta s$ , GPS の誤差分 布の標準偏差  $\sigma \epsilon$  用い, それぞれに比例するように以下の 式 (6) で定義する (ただし  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  は定数とする).

$$w_{ro} = \alpha(s+\beta)(\sigma+\gamma) \tag{6}$$

図 11, 図 12 に示したデータを用いて, 定数 α, β, γ を 最小二乗法により求め,以下の式 (7) を得たため,これを



図 13 LRS 保持ノード数に対する正答率変化

Fig. 13 Impact of the number of nodes equipped with LRS.

用いて wro を決定するものとする.

$$w_{ro} = 0.082(s - 1.817)(\sigma + 0.817) \tag{7}$$

本節で定めた式 (7) を得る過程で使用した図 10 の地形 は,建物が存在しない領域と,建物が密に存在する領域が 混在するような比較的よくみられる地形である.また,後 述のシミュレーション実験で得られた図 19 の結果もこの 値を用いており,ある程度の汎用性が示されていると考え る.したがって以降の節でのシミュレーションでは式 (7) を用いて重み係数を設定する.

### 4.3 評価結果

本節では、4.1 節で述べたシミュレーション環境におけ る提案手法の性能評価結果について述べる。4.3.1 項では ノード数および LRS 保持ノード数が精度に与える影響を 評価する。4.3.2 項では GPS の誤差分布が精度に与える影 響を評価する。4.3.3 項ではモビリティが精度に与える影 響を評価する。4.3.4 項では 2 章で述べた先行研究との比 較結果について述べる。

4.3.1 ノード数とLRS保持ノード数が精度に与える影響

ノード数NとLRSを保持するノード数 $N_L$ が地図生成 時間, 推定精度に与える影響を評価する. ノード数 N = 15 としLRS を保持するノード数 NL を変化させたときの正答 率の時間変化を図 13 に示す. LRS 保持ノード数が多いほ ど正答率が高い傾向にあることが分かる.これは LRS 保 持ノード数が多いほど、より多くの領域に関する情報を取 得できるためと考えられる.また、LRS 保持ノード数 NL が0の場合,正答率90%以上を達成するために約500秒以 上のログが必要であったのに対し、LRS 保持ノード数 NL が0より大きい場合には、約200秒のログで約90%の正答 率を達成できることが分かる.このことから,提案手法で は LRS を用いることにより、地図生成に必要な時間を大 幅に短縮できているといえる.一方,使用する LRS を増 やしても正答率の上限は大きく変化しないが, これは LRS 保持ノードが同じ領域を重複して巡回する事態が増えるた めである.

次に LRS 保持ノード数  $N_L$  を 0, 5 とし, ノード数 N を



Fig. 14 Impact of the number of nodes.



図 15 GPS の誤差分布に対する正答率変化 Fig. 15 Impact of GPS errors.

変化させたときの正答率の時間変化をそれぞれ図 14(a), 図 14(b) に示す. どちらもノード数が多いほど短時間で高 精度な地図生成がなされている. また、LRS 保持ノード数  $N_L$ が0の場合にはノード数N = 5の正答率はノード数 N = 15の正答率に比べ15%低いが、LRS 保持ノード数 $N_L$ が5の場合、ノード数N = 5の正答率はノード数N = 15の正答率に比べ4%低いのみである.このことから、LRS によりノード数の減少が誤差に与える影響を小さくしてい るといえる. さらに LRS 保持ノード数  $N_L = 5$ , ノード数 N = 5の場合の地図生成時間,正答率は, $N_L = 0$ , N = 10の場合と比べ良いものとなっている。このことから、LRS を全員が保持することにより、少人数での地図生成が実現 できることが示されている.また、ノード数が少ないほど、 LRS を使用することによる正答率の向上は顕著なものとな る.これはノード数が少ないほど、LRS 以外の情報源から 得られる情報が少なくなり、LRS データの正答率に対して 与える影響が相対的に大きくなるためである.

## 4.3.2 GPS の誤差分布が精度に与える影響

GPS の誤差分布が地図生成時間,推定精度に与える影響 を評価する.GPS の誤差分布の標準偏差  $\sigma$  を変化させた ときの正答率の時間変化を図 15 に示す.誤差の標準偏差  $\sigma$ が大きいほど,正答率が低くなる傾向にはあるものの, 誤差の標準偏差  $\sigma$  を 8 m とした場合でも 85%近い正答率 を達成している.



図 16 ノードのモビリティによる正答率の変化 Fig. 16 Impact of mobility.

また、本手法では各時刻における GPS の誤差分布を独 立な正規分布として考えているが、実際には、GPS の誤差 は直前の測定における誤差と近い値をとるなど、GPS の誤 差分布は時間的に独立ではない.よって、GPS の誤差をよ り正確にモデル化し提案手法における尤度の設定の仕方を 修正することにより、実際の環境でより高い精度の地図が 得られるようになることが期待できる.

#### 4.3.3 モビリティが精度に与える影響

一部の人員が地図生成に専念して移動した場合に、より 高精度な地図を短時間で生成できる可能性がある. そこで, 本項ではノードのモビリティが地図精度に与える影響を評 価する.前項までは図10中の線で表される経路上の交点 で後方以外の方向をランダムに選択するモビリティを用い て評価を行った.本項では,効率的に領域全体を網羅する ように人が設計した、より戦略的なモビリティに従うノー ドが存在した場合に、それらのノードが地図生成時間、精 度へ与える影響を評価する.ノード数N=6とし、うち3 ノードが戦略的モビリティに従うノード (sノード),他の 3ノードが前項までと同じくランダムに経路を選択するモ ビリティに従うノード (r ノード) とする. LRS 保持ノー ド数  $N_L = 3$  とし, s ノードが LRS を保持していた場合と r ノードが LRS を保持していた場合の正答率の時間変化を 図 16 に示す.sノードにLRS を持たせた場合がrノード に LRS を持たせた場合と比べ短時間で高精度な地図生成 が行われていることが分かる.このことから、ノードが戦



図 17 先行研究との比較

Fig. 17 Comparison with the previous method.



(a) 医学部保険学科棟
 (b) 福利厚生棟
 図 18 対象とする建造物
 Fig. 18 Target buildings.

略的に移動することにより地図生成時間の短縮,地図精度 の向上を可能とすることができるといえる.

## 4.3.4 先行研究との比較

先行研究 [2], [3] との比較のため,4.1 節で述べた環境と 同じ環境で先行研究ならびに提案手法のシミュレーショ ンを行った.先行研究と提案手法の正答率の時間変化を 図 17 に示す.先行研究では350 秒で正答率が約87%に収 束しているが,提案手法では約200 秒で90%を超える正答 率となっている.このことから,提案手法では先行研究と 比較して同程度以上の精度の地図を生成するのに必要な時 間を大幅に短縮できるといえる.

次に、生成される地図の建造物形状についての評価を行う.より凹凸のある複雑な形状の建造物を用いて評価を行うため、対象とする建造物は大阪大学医学部保険学科棟、 大阪大学福利厚生棟を模した領域(図 18(a),図 18(b)) を用いた.ノード数 N = 5, GPS の誤差分布の標準偏差  $\sigma = 3 \text{ m } \text{ b } \text{ L}$ ,ノードは図中の線で表される経路上を移動 するものとする.また提案手法ではすべてのノードが LRS を保持するものとする.

先行研究と提案手法それぞれで出力された地図を図 19 に示す.図中の円に示されるように先行研究では細かい形 状まで再現できず,また四角形近似処理を行うため,四角 形でない建造物が正確に再現されない.一方,提案手法で は,より正確な凹凸を再現しており,また四角形でない建 造物についても,より元の形状に近い形状となっている.

このことから提案手法では LRS を使用することにより, 再現しうる形状の幅が広がったことが確認された.



図 19 出力される建造物形状 Fig. 19 Output shape of buildings.

### 5. あとがき

本稿では LRS を保持した移動無線端末による屋外地図 生成手法を提案した.提案手法では対象領域をセルに分割 後,GPS の位置情報,通信履歴および LRS の測定結果か らそれぞれ,GPS の誤差分布と通信時のパケットロスなど を考慮して各セルにおける障害物領域尤度および移動領域 尤度を算出し,それらの尤度を用いて各セルが障害物領域 か移動領域かを最終的に決定し障害物地図を得る.

シミュレーションにより,15ノードのうち3ノードのみ がLRSを保持することにより,150m×190mの領域にお いて200秒で約90%程度の正答率の地図生成を実現した. また,LRSが地図の生成時間短縮,推定精度向上に大きく 寄与しており,少人数においても高精度な地図生成を実現 できることを確認するとともに,ノードを戦略的に移動さ せることによりさらなる地図生成時間短縮,推定精度向上 が可能であることを示した.さらに,先行研究と比べてよ り短時間で高精度の地図を生成できることを示した.その ほか,複雑な形状をした建造物についてもLRSを用いる ことで形状の正確さを大幅に改善できることを確認した.

今後の手法の改善として,LRS データの形状を比較し, つなぎ合わせて障害物の形状を再現することが考えられる. その形状を用いて地図上の障害物表面を表現することで, より精密な形状が再現された地図の生成が期待できる.ま た,屋内外での地図生成をシームレスに行う技術の開発に 取り組む予定である.

#### 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),入手先 (http://www.sen.jst.go.jp/theme/ theme\_h19/Higashino.html>.

- [2] 南本真一,藤井彩恵,山口弘純,東野輝夫: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,情報処理学会論文誌, Vol.51, No.12, pp.2169–2183 (2010).
- [3] Minamimoto, S., Fujii, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Map estimation using GPS-equipped mobile wireless nodes, *Pervasive and Mobile Computing, Elsevier*, Vol.6, No.6, pp.623–641 (2010).
- [4] Gandhi, T. and Trivedi, M.: Pedestrian protection systems: Issues, survey and challenges, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.3, pp.413–430 (2007).
- [5] 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).
- [6] Diosi, A. and Kleeman, L.: Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping, Proc. 2004 IEEE/RSJ InterNational Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1854–1859 (2004).
- [7] 根岸善朗,三浦 純,白井良明:全方位ステレオとレーザ レンジファインダの統合による移動ロボットの地図生成, 日本ロボット学会誌,Vol.21, No.6, pp.690-696 (2003).
- [8] Polychronopoulos, A., Tsogas, M., Amditis, A. 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).
- Rockl, M., Strang, T. and Kranz, M.: V2V communications in automotive multi-sensor multitarget tracking, *Proc. VTC-2008-Fall*, pp.1–5 (2008).
- [10] 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).
- [11] Fang, C.-Y., Chen, S.-W. and Fuh, C.-S.: Road-sign detection and tracking, *IEEE Trans. Vehicular Technol*ogy, Vol.52, No.5, pp.1329–1341 (2003).
- [12] Durrant-Whyte, H. and Bailey, T.: Simultaneous localization and mapping: PartI, *IEEE Robotics and Au*tomation Magazine, Vol.13, No.2, pp.99–110 (2006).
- [13] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping, *Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.321– 328 (2000).
- [14] Besl, P. and McKay, N.: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239–256 (1992).
- [15] Russ, J.: The image processing handbook, CRC press (2006).
- [16] Scalable Network Technologies: QualNet (online), available from (http://www.scalable-networks.com/ products/qualnet/).
- [17] Remcom: Wireless InSite (online), available from (http://www.remcom.com/wireless-insite).
- [18] Parsons, J.: The mobile radio propagation channel, Wiley (1992).





機株式会社に勤務.



# 井ノ口 真樹 (学生会員)

平成23年大阪大学基礎工学部情報科 学科卒業.同年より同大学院情報科学 研究科情報ネットワーク学専攻博士前 期課程在学.モバイルコンピューティ ングに関する研究に従事.

## 藤井 彩恵 (正会員)

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.平成 23 年同大学院博士後 期課程修了.在学中はアドホックネッ 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.現在,三菱電

# 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).モ バイルコンピューティング等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.