

レーザー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^{†1} 藤井 彩恵^{†1}
山口 弘純^{†1,†2} 東野 輝夫^{†1,†2}

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、搬送を行う上で必要不可欠である。これに対し我々は、救命チーム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を開発している。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、一部の端末が保持するレーザーレンジスキャナ(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。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端末のうちの3端末が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%程度の精度での地図生成を実現し、LRSが地図生成時間の短縮および推定精度の向上に大きく寄与していることを確認した。また、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。

Outdoor Map Estimation by Using Laser Range Scanners and Mobile Terminals

INOKUCHI MASAKI,^{†1} SAE FUJII,^{†1}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2} and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

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. Our 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, we have proposed a method to automatically generate a map by using position information from GPS and communication history. However, this method cannot capture the detailed shapes of buildings

or other objects. Also it needs sufficient time to collect position information and communication history in order to achieve accurate estimation. In this paper, we propose a method to generate outdoor maps with high accuracy in a short time by using information provided by Laser Range Scanners (LRSs) of mobile terminals in addition to position information and communication history. From the simulation results, when only 3 of 15 terminals hold LRSs, the proposed method could generate a map of 150m x 190m with 90% accuracy in 200 seconds. Thus it is confirmed that LRSs contribute to saving map generation time and improvement of estimation accuracy.

1. ま え が き

近年、スマートフォンなどアドホック通信機器を搭載した端末の普及に伴い、移動端末から構成される無線アドホックネットワークの環境対策、防災、医療など様々な分野への応用が期待されている。

我々の研究グループでは、地震など短期間に多くの傷病者が発生するような大規模災害現場において傷病者の容態に合わせて治療の優先度を決定するトリアージを支援するために、リアルタイムに傷病者の生体情報を無線アドホックネットワークを介して集約し、傷病者の位置や病状変化をリアルタイムに監視し提示するシステムを開発している¹⁾。このようなシステムを利用して傷病者を迅速に発見し救命活動を行うためには、災害現場の地理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、駐車車両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では対応できない。また、航空写真などを利用し地理情報を得ることが考えられるが、地理情報を生成するための補助人員が必要であり、救命活動のための人員不足が指摘されている大規模災害現場では適切ではない。

このような背景に基づき、我々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を提案している^{2),3)}。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

^{†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 and Technology Agency, CREST

することなく、短期間である程度高い再現率の地図を生成できることが確認されている。他方、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ことや、GPS の位置情報と通信履歴のみでは得られる情報量が少ないために地図生成時間短縮や精度向上に限界があることなどの課題があった。

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盛んに研究されている^{4)–8)}。LRS により障害物表面の細かな形状を取得できるため、LRS を地図生成へ応用することで細部まで詳細に再現された地図の生成が期待される。また、一度の測定で LRS の周囲数メートルに存在する障害物の情報を取得できるため、地図生成速度、精度の向上が期待される。

そこで、本研究ではノードの位置情報や通信履歴に加え、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 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である尤度を算出する。また、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。

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た。その結果、15 ノードのうちの 3 ノードが 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% 程度の精度の地図が生成できることを確認し、LRS が地図生成時間の短縮および推定精度の向上に大きく寄与していることを示した。また、先行研究と性能を比較し、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。

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。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、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^{9)–11)}、標識認識¹²⁾ 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、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^{5),13)} 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て、対象領域の地図を生成する。また、LRS を用いた環境推定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⁶⁾、LRS と超音波センサ、ステレオカメラなどを併用して地図を生成する手法^{7),8)} 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同士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、ICP アルゴリズムなどを用いて LRS のデータを統合して地図生成を行うためには、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。移動ロボット分野における地図生成手法はロボットに LRS を固定するため、センサの位置や向きを比較的高い精度で把握することが可能となる。本研究のように人間に測距デバイスを装着し地図を生成する際には、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。さらに、本研究のように複数の情報源から得た情報を用いる手法では、情報源の信頼性がそれぞれ異なるため、情報を単純に統合することができない。そのため、提案手法のように情報源ごとに信頼性を考慮して重み付けするなどの工夫が必要となる。

前述の周囲環境情報取得技術ではカメラや、レーザレンジセンサなどのデバイスを必要とするのに対し、我々の先行研究^{2),3)} では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 付き無線端末のみを仮定し、特別なハードウェアを必要としないという利点を持つ。以下、先行研究について説明する。先行研究における地図生成アルゴリズムの処理概要を図 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、訪問数が一定値を越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リング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

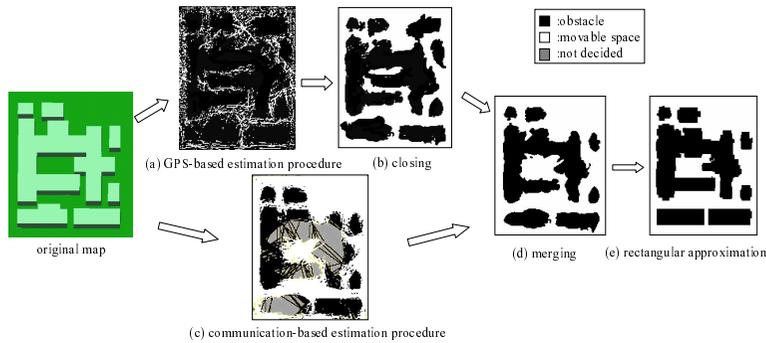


図 1 先行研究の処理概要

Fig. 1 Outline of the previous method

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))。続いて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))。

このアルゴリズムを用いて、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ている。一方で、位置誤差が大きくなると地図の精度が低下する、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。これらの課題に対し、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上で、位置誤差の影響を軽減し、かつ様々な形状の建物に対応可能な手法を提案する。

3. 障害物地図生成手法

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、小規模な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、ID (ID_i で表す) および取得時

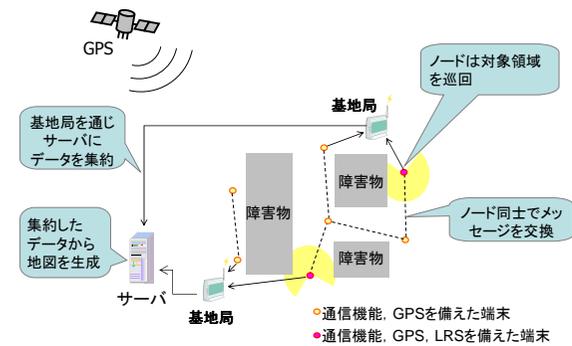


図 2 想定環境

Fig. 2 Environment of the proposed method

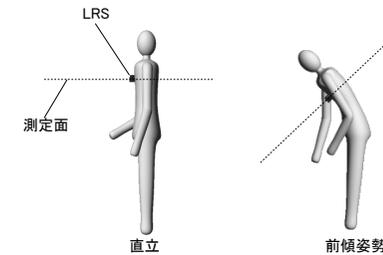


図 3 LRS の取り付け例

Fig. 3 Installation example of the LRS

刻 t とともに (t, ID_i, p_i) の組として記録する。これを **GPS ログ** と呼ぶ。また、 ID_i と直前に測定した位置情報 p_i を定期的に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' と共に $(t', ID_j, p_j, ID_i, p_i)$ 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 θ_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 θ_k ($k = 0, \dots, \theta_L/\Delta\theta$)

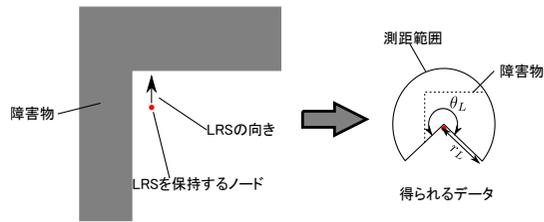


図 4 LRS による測定
Fig. 4 Measurement with LRS

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 $(t'', ID_i, p_i, \{\theta_k, d_k\}_{k=0, \dots, \theta_L/\Delta\theta})$ 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, $\{\theta_k, d_k\}_{k=0, \dots, \theta_L/\Delta\theta}$ 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定期的に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.

3.2 提案手法の概要

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判定する. 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 $\{A_{a,b} | 1 \leq a \leq m, 1 \leq b \leq n\}$ で表す.

提案手法の概要を図 5 に示す. 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尤度として算出する. また, 一般に情報源が異なると得た情報の信頼性も異なると考えられるため, 情報源ごとに独立して尤度を算出し, 最後に信頼性を考慮し統合するという方針をとる. まず, GPS ログおよび LRS データから各セル $A_{a,b}$ が障害物領域である尤度 $Go_{a,b}$ と各セル $A_{a,b}$ が移動領域である尤度 $Gm_{a,b}$ を計算し, $Go_{a,b}$ から障害物尤度地図 Go を, $Gm_{a,b}$ から移動領域尤度地図 Gm を作成する (図 5(a)). 同様に通信ログから各セル $A_{a,b}$ が障害物領域である尤度 $Ro_{a,b}$ と移動領域である尤度 $Rm_{a,b}$ を計算し, 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

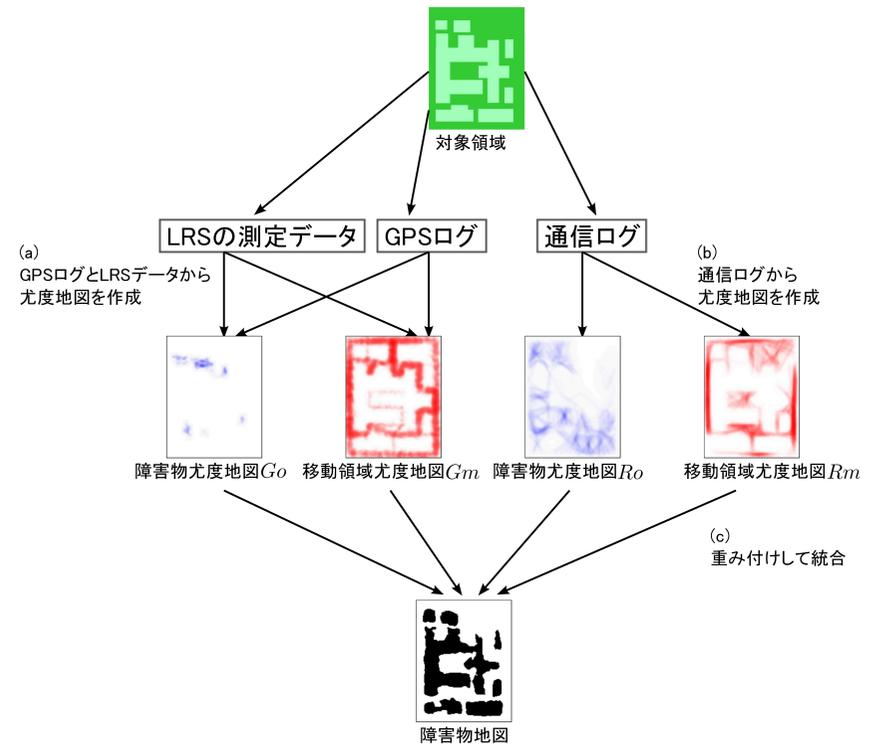


図 5 提案手法の処理概要
Fig. 5 Outline of the proposed method

(図 5(b)). このようにして得られた 4 つの尤度地図についてそれぞれ情報源の信頼性を考慮して重み付けし, 各セル $A_{a,b}$ の重み付けした障害物尤度, 移動領域尤度の大小に基づき, 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)).

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を反射することを想定しているため, 各 LRS データ (t, ID_i, p_i, L_i) に対し, 位置 p_i から方角 θ_k , 距離 d_k までの範囲には障害物がないと考えられる. 一方で, LRS が観測した障害物より奥の情報は得られない. すなわち, 位置 p_i から方角 θ_k , 距離 d_k から距離 r_L までの範囲には障害物領域と移動領域の両方の可能性がある. しかし, 一般的な建造物

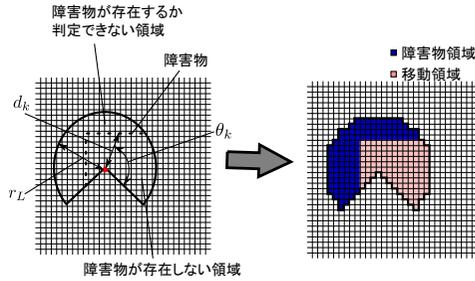


図 6 LRS データを用いた移動領域および障害物領域の判定例

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

の大きさは数十メートルであり、LRS の測定距離 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領域である可能性が高いとみなす。

また、提案手法ではノードは移動領域のみを移動するものと仮定している。このため、GPS の測位間隔を Δt 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みなす。

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、GPS ログから障害物領域、移動領域であると判定されたセルのみの尤度を更新した場合、GPS の誤差による影響が大きくなることが予想される。そこで、GPS の誤差の影響を軽減するために、提案手法では LRS データと GPS ログから障害物領域、移動領域であると判定されたセルから距離 r_R 以内のセルに対して、GPS の誤差の分布を考慮した尤度の更新を行う。一般にあるノード i の正しい位置を q_i としたとき、GPS によって取得した位置 p_i となる確率は p_i が 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 σ_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 $\pm 3\sigma_L$ 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_R を $3\sigma_L$ とする。そして、LRS データまたは GPS ログからセル $A_{a,b}$ を障害物領域、移動領域であると判定した際には、 $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R$ を満たす各セル $A_{a',b'}$ ($a' = a + \Delta a, b' = b + \Delta b$) について、それぞれ障害物尤度 $Go_{a',b'}$ または移動領域尤度 $Gm_{a',b'}$ に以下の関数 $l(\Delta a, \Delta b)$ で定義さ

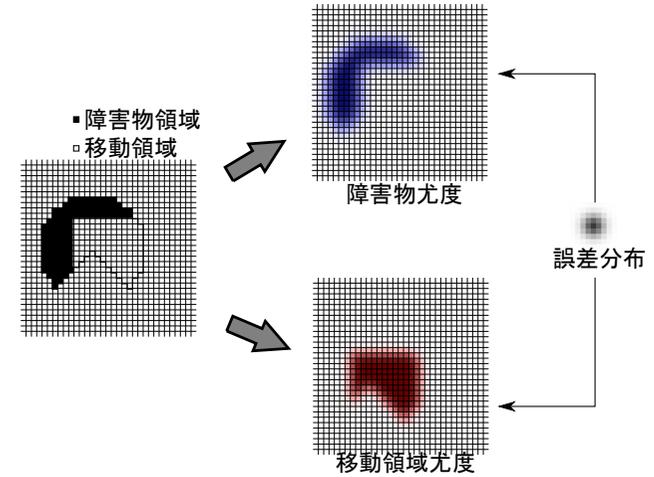


図 7 LRS データによる尤度算出

Fig. 7 Calculation of the likelihood using LRS data

れる値を加算する。

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

以上の方法により、図 7 に示すように、LRS データにより障害物領域、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 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 $A_{a,b}$ の障害物尤度 $Go_{a,b}$ および移動領域尤度 $Gm_{a,b}$ の初期値を 0 とする。

- (1) ある LRS データ $(t, ID_i, p_i, \{\theta_k, d_k\}_{k=0, \dots, \theta_L/\Delta\theta})$ に対し、 p_i と p_i から方角 θ_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 と p_i から方角 θ_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 ($k = 0, \dots, \theta_L/\Delta\theta$) について行う。
- (2) ノード i によって連続して記録されたある 2つの GPS ログ (i, p_i, t) と (i, p'_i, t') に対し、 p_i と p'_i 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 $Go_{a',b'}$ 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、提案手法はある時刻 t においてある 2 ノード i および j に対し、 $(t, ID_i, p_i, ID_j, p_j)$ が存在する場合には線分 $p_i p_j$ 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 $p_i p_j$ 上を障害物領域と推定する。ただし、LRS データ、GPS ログから尤度を更新する場合と同様に、GPS で取得した位置には誤差が含まれるため、通信ログからセル $A_{a,b}$ の尤度を更新する際には、距離 r_R 以内のセルに対しても、GPS の誤差の分布を考慮した尤度の更新を行う。さらに、実際の環境では、最大通信距離 R 以下であり、互いに見通せる位置にあっても、障害物からのマルチパスなどの要因でパケットロスが起こる可能性がある。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 $A_{a,b}$ を障害物領域であると判定した際には、 $\sqrt{(S\Delta a)^2 + (S\Delta b)^2} \leq r_R$ を満たす、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。

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

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 $A_{a,b}$ の障害物尤度 $Ro_{a,b}$ および移動領域尤度 $Rm_{a,b}$ の初期値を 0 とする。

- (1) ある時刻 t においてある 2 ノード i および j に対し、 $(t, ID_i, p_i, ID_j, p_j)$ が存在する場合には線分 $p_i p_j$ 上のセルを移動領域と推定する。ノード間の距離が R 以下であ

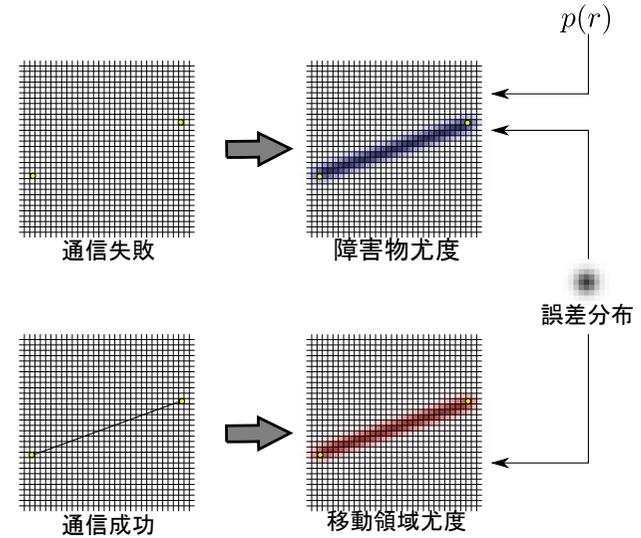


図 8 通信ログによる 2 ノード間の尤度算出

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

り、通信ログが存在しない場合には線分 $p_i p_j$ 上のセルを障害物領域と推定する。

- (2) 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) 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と 2 つの移動領域尤度地図を統合することで、時刻 t における障害物地図を得る。このとき、セル $A_{a,b}$ は以下の不等式 (3) が真ならば障害物領域、偽ならば移動領域として判定する。

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

$Go_{a,b}$, $Gm_{a,b}$ は GPS ログおよび LRS データから得た障害物尤度、移動領域尤度であり、 $Ro_{a,b}$, $Rm_{a,b}$ は通信ログから得た障害物尤度、移動領域尤度である。また、 w_{go} , w_{ro} , w_{gm} ,

w_{rm} は各尤度地図の重みを表す。

ここで、通信ログを用いた尤度地図の生成において、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。このため、通信ログによる障害物尤度地図の重み w_{rm} は他の重みとは異なる値を設定する必要があると考えられる。このことを確認するために、4.1節で述べるような評価環境で簡単な実験を行った。GPSの x 方向の位置誤差および y 方向の位置誤差の分布を平均0、分散 σ^2 の正規分布とした結果、重みを $w_{go} = w_{gm} = w_{rm} = 1$ とし w_{ro} を適切な値に設定することで、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。

$$w_{ro} \geq \frac{Gm_{a,b} + Rm_{a,b} - Go_{a,b}}{Ro_{a,b}} \quad (4)$$

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 μ_{go} 、 μ_{gm} 、 μ_{ro} 、 μ_{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、障害物領域であるか移動領域であるかの判定が正しい割合が最も高くなるような重み w_{ro} とパラメータ s との関係は4.1節で述べるような評価環境で評価した。

$$s = \frac{\mu_{gm} + \mu_{rm} - \mu_{go}}{\mu_{ro}} \quad (5)$$

その結果、図9に示されるように最適な重み 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、各尤度地図の精度はGPSの誤差分布の標準偏差 σ に大きく依存すると考えられるため、重み 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 σ に対する最適な重み w_{ro} の値の関係を調べたところ図10に示されるように、GPSの誤差分布の標準偏差と最適な重み w_{ro} はほぼ比例することが分かった。

以上より、重み w_{ro} をパラメータ s 、GPSの誤差分布の標準偏差 σ を用いて以下の式 (6) で定義する (ただし a, b, c, d は定数とする)。

$$w_{ro} = as\sigma + b\sigma + cs + d \quad (6)$$

図9、図10に示したデータを用いて、定数 a, b, c, d を最小二乗法により求め、以下の式 (7) を得た。

$$w_{ro} = 0.082s\sigma - 0.149\sigma - 0.067s - 0.302 \quad (7)$$

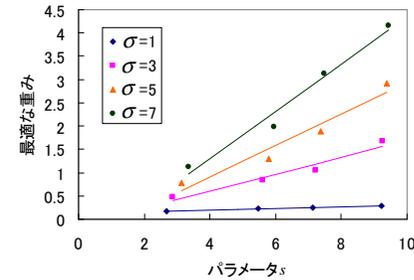


図9 重みとパラメータ s の関係
Fig. 9 Relations between the weight and parameter s

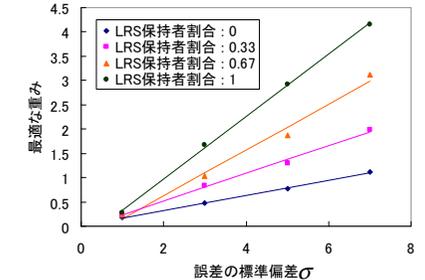


図10 重みと誤差分布の関係
Fig. 10 Relations between the weight and distribution of the error

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 Qualnet¹⁶⁾ を用いて評価した。対象領域として大阪大学歯学部 (図11) を抽象化した領域 (図12) 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12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 1.5m/s、分散 $0.01\text{m}^2/\text{s}^2$ 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 $r_L = 10\text{m}$ 、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 の誤差と比べて十分に小さいため、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 InSite¹⁷⁾ モジュールを利用した。無線通信デバイスの周波数帯は 2.4GHz 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 $\sigma^2\text{m}^2$ の正規分布に従うものとし、その測位周期は 1 秒とした。



図 11 対象領域の航空写真
Fig. 11 Air photograph of target area

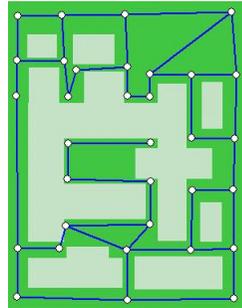


図 12 シミュレーションマップ
Fig. 12 Simulation map of target area

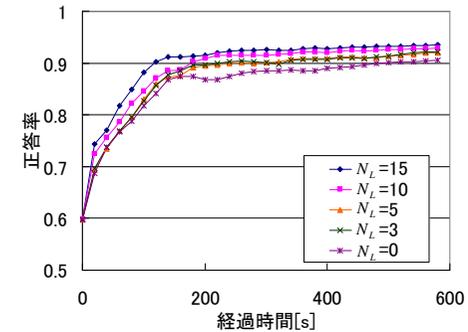


図 13 LRS 保持ノード数に対する正答率変化
Fig. 13 Impact of the number of nodes equipped with LRS

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 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 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 σ_L は $\sqrt{2}\text{m}$ 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 σ は評価項目ごとにそれぞれ設定する。ただし、それぞれ $N = 15$ 、 $N_L = 3$ 、 $\sigma = 4\text{m}$ 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。その上で、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。

4.2 評価結果

本節では、前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。4.2.1 節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。4.2.2 節では GPS の誤差分布が精度に与える影響を評価する。4.2.3 節では 2 章で述べた先行研究との比較結果について述べる。

4.2.1 ノード数と LRS 保持ノード数の地図生成へ与える影響

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、推定精度へ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 N_L 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 N_L 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 N_L 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言える。

次に LRS 保持ノード数 N_L を 0、5 とし、ノード数 N を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% 減少しているが、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% の減少に抑えられている。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言える。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、少数数での地図生成が実現できることが示されている。

4.2.2 GPS の誤差分布の地図生成へ与える影響

GPS の誤差分布が地図生成時間、推定精度へ与える影響を評価する。GPS の誤差分布の標準偏差 σ 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 σ 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 σ を 8m とした場合でも 85% 近い正答率を達成しており、GPS の精度が悪化してもある程度正答率の高い地図生成

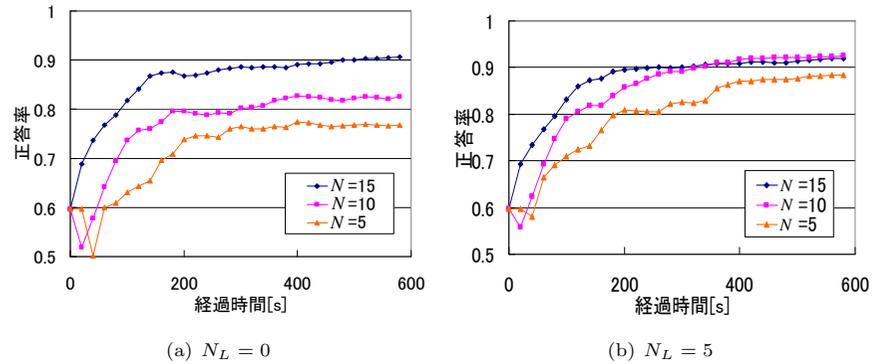


図 14 ノード数に対する正答率変化
 Fig. 14 Impact of the number of nodes

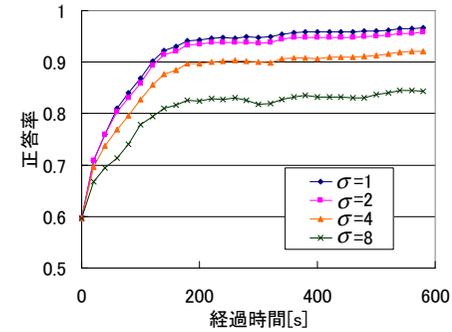


図 15 GPS の誤差分布に対する正答率変化
 Fig. 15 Impact of GPS errors

を実現できると言える。一方で、600 秒間のログを用いた場合、誤差の標準偏差 σ が 2m の場合には図 16(a) のような障害物地図が得られ、8m の場合には図 16(b) のような障害物地図が得られる。このように誤差の標準偏差が大きい場合には可読性の低い地図となる。このため、GPS の誤差が大きい場合には、誤差を補正する方法や可読性を向上させるための工夫が必要である。

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。

4.2.3 先行研究との比較

先行研究^{2),3)} との比較を行う。先行研究では 4.1 節で述べた環境と同じ環境でシミュレーションを行う。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言える。

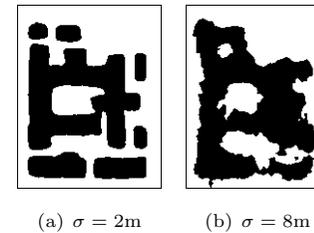


図 16 GPS の誤差分布の違いによる生成される地図の比較
 Fig. 16 Comparison of generated maps in the case of different GPS errors

5. 提案手法の性能向上に向けて

5.1 提案手法の課題

先行研究と同様に、提案手法は GPS に依存するため、GPS の誤差が大きい場合には図 18 に示されるように全体的に線分認識があまくなる傾向がある。また、LRS から得た情報は尤度算出の際の障害物領域セルと移動領域セルの判定にのみ用いられるため、障害物表面の凹凸などの細部の情報が十分に利用できていない。また、3.5 節で述べたように尤度地図を統合する際の重みは GPS の誤差分布および各尤度地図の尤度の平均値を用いて経験的に設定するが、ノードの密度、モビリティ、対象領域の地形によって適切な重みも変化すると考えられるため、これを戦略的に決定できれば更なる性能向上が期待できる。

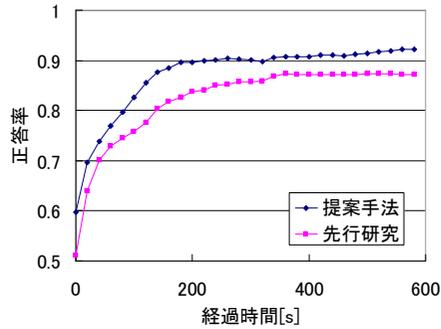


図 17 先行研究との比較

Fig. 17 Comparison with the previous method

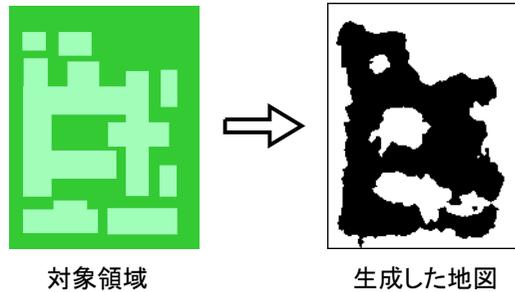


図 18 GPS の誤差が大きい場合の地図生成例

Fig. 18 Example of map generation in the case of large GPS errors

5.2 手法の改良案

本節では、前述の課題を克服するための手法の改良案について述べる。

LRS を保持するノードの正確な位置がわかれば、その位置に LRS から得たデータを当てはめることにより、障害物表面の凹凸まで再現された、詳細な地図を得ることができる。また、このとき、LRS を保持するノードが全ての通路を通過した場合には、全ての通路を正しく認識できる地図となる。しかし、実際には GPS の位置情報が含む誤差により LRS を保持するノードの正確な位置はわからない。そこで、提案手法で作成した尤度地図と LRS データを用い LRS を保持するノードの位置を推定することを考える。ここで、障害物領域と移動領域の境目である壁が存在するセルは近傍に移動領域と障害物領域が存在する。この

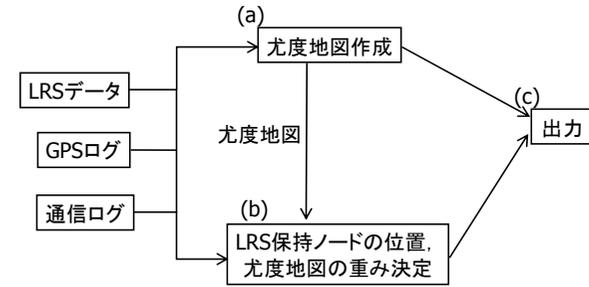


図 19 手法改良案の流れ

Fig. 19 Flow of the idea to improve proposed method

とき移動領域尤度と障害物尤度の差は比較的小さくなると考えられる。よって、壁が存在するとしたら、3.5 節で述べた式 (3) において尤度を重み付けし障害物領域または移動領域と判定する際に右辺と左辺の差が小さいようなセルである可能性が高いと考えられる。さらに、近傍セルと尤度値の変化が大きいセルについても壁が存在する可能性が高いといえる。一方、LRS データからは障害物表面の情報が得られる。よって、LRS データから得た障害物表面と壁が存在する可能性が高いセルとが同じ位置となるように LRS を保持するノードの位置を補正することができる。

また、本研究が想定する環境では LRS から連続して正確な情報が得られるとは限らないため、LRS でデータを得ていない領域については提案手法と同様に尤度地図から最終的な地図を得る必要がある。この際、LRS を保持するノードの位置を割り出すと同時に 3.5 節で述べた重み w_{go} , w_{ro} , w_{gm} , w_{rm} を LRS データおよびその位置によって動的に決定することが考えられる。

これらの方針に基づく手法改善の概念図を図 19 に示す。各時刻において LRS データ、GPS ログ、通信ログを得ると、まず、3 章で説明した手法で尤度地図を生成する (図 19(a))。次に、生成した尤度地図および LRS データ、GPS ログ、通信ログから、LRS を保持するノードの位置を補正し、さらに 3.5 節で述べた式 (3) における重みの値を補正する (図 19(b))。最後に補正した重みの値で尤度地図を統合し、その上に LRS のデータを補正した位置に重ね合わせ、出力を得る (図 19(c))。

6. 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可能領域尤度を算出し、それらの尤度を用いて各セルが障害物領域か移動可能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。また、GPS 誤差が大きい場合の手法改善案を示した。現在はこれらの手法の詳細設計を行っている。

今後は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）．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) 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).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) Rockl, M., Strang, T. and Kranz, M.: V2V communications in automotive multi-sensor multitarget tracking, *Proc. VTC-2008-Fall*, pp.1–5 (2008).
- 11) 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).
- 12) 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).
- 13) Durrant-Whyte, H. and Bailey, T.: Simultaneous localization and mapping: PartI, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.13, No.2, pp.99–110 (2006).
- 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)., <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>.
- 17) Remcom: Wireless InSite (online)., <http://www.remcom.com/wireless-insite>.
- 18) Parsons, J.: *The mobile radio propagation channel*, Wiley (1992).