# 11 無線端末の移動通信履歴を用いた自動地図生成

山口弘純 （大阪大学大学院情報科学研究科／（独）科学技術振興機構，CREST）

## 地理位置情報とユビキタス社会

現代社会において，位置情報サービスを利用しないことはまずないだろう．車に乗ればナビゲーションシステムでどこへでも迷わず行けるし，街中の無線 LAN スポットから位置を特定する PlaceEngine のようなサービスも稼働している．位置情報に道路情報や店舗情報のような地理情報を組み合わせれば，個人の行動を支援することもできるし，多数の人や車の位置情報を集めて行動解析や都市計画などにも利用できる．

このように位置情報と地理情報を用いてサービスを提供する地理情報システム（GIS）の活用については国も力を入れている．地理空間情報活用推進会議（内閣官房）[1] では，2009 年 6 月の「地理空間情報の活用推進に関する行動計画（G 空間行動プラン）」で官主導の地理情報活用プロジェクトの概要を紹介している．GPS のシームレスな屋内利用を可能とする IMES（Indoor Messaging System），都市空間における 3 次元空間地図の時系列による人の動線解析，基準座標系の高精度化，地図情報の集約と整備の効率化，ハザードマップや防災情報，防犯情報の共有化によるデータ活用の促進などが今後の重点課題として挙げられている．

上記で述べたように，地理情報システムの多くは，

- GPS や ID タグで得た人やモノの絶対位置情報
- あらかじめ用意された地図情報

を組み合わせた位置情報活用である．一方で，あらかじめ用意された地図情報がないか，あるいはすぐには準備できない状況において，

- センサなどで得た人・モノ・建造物（障害物）などの『位置関係』情報

のみから，ごく周辺の「見取り図」をその場で生成するシステムへのニーズも高まっている．たとえば，車載レーダや DSRC（Dedicated Short Range Communication）機器により，歩行者・周辺の建物や街路樹・併走車両や対向車両を認識し，それらの存在位置を示した周辺地図を生成して表示すれば，運転者の周辺認識を助け，安全運転に大きく貢献できる．また，自律移動ロボットは，壁などの移動障害物を認識し，可動領域を計算しながら移動を行うことを繰り返す必要がある．

しかし，利用できるセンサはシステムやアプリケーションによって異なるため，センシングで得られるデータはさまざまである．また不確定な状況推定を積み重ね，人やロボットが認識しやすい形の周辺地図をなるべく高い精度で，状況によっては高速に生成しなくてはならないなど，多くの課題が残されているといってよいだろう．

人やモノの位置関係情報のみから地図を自動生成する方法を，以下では「オンデマンド地図生成」と呼ぶことにする．本稿では，オンデマンド地図生成が以前より研究されてきた自律移動ロボットにおける基本手法を紹介する．また，筆者の所属するグループでは，災害時救命活動支援にもオンデマンド地図生成が有効であると考え，その実現に向けた研究開発に取り組んでいるため，それもあわせて紹介する．

## 自律移動ロボット向け地図生成

ロボットが自律的に移動するためには，移動できる領域を認識することが必要である．しかし，初めて移動する建物内などでの地図は入手できないと考えるのが自然である．そこで自律移動ロボットでは，位置推定と地図推定を同時に行う SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）と呼ばれる方法が一般的に用いられる．自律移動ロボットは，自分の移動量（移動距離や方向）を測定しながら，壁など障害物までの距離や角度などをセンシングする．移動量から移動軌跡を推定し，移動軌跡とセンシングデータとが最もつじつまの合うように，障害物地図と自分の位置とを同時並行的に推定する．また，カルマンフィルターなどに基づき，新たな移動量とセンシングデータが得られるにつれて，「もっともらしい」地図や位置へと収束していく．SLAM は自律移動ロボット向け地図作成の標準的なアプローチであり，さまざまな方法が知られているが，ここでは基本的な原理を紹介する[2]．

地図やロボットの状態など，推定すべき「状態」を

$x$，センシングデータに相当する「観測」を $d$ で表す．ベイズの定理では，観測 $d$ のもとで状態が $x$ である確率 $p(x \mid d)$ は，

$$p(x \mid d) = \eta \cdot p(d \mid x) \cdot p(x)$$

で与えられる．$p(d \mid x)$ は状態 $x$ において観測 $d$ が生じる確率（観測の起こりやすさ，尤度），$p(x)$ は状態 $x$ の元々の確からしさ，$\eta$ は正規化係数を表す．

観測 $d$ は時々刻々と得られるため，以下では，時刻 $t$ に得られる観測 $d$ を $d_t$ で表し，時刻 $t$ までの観測系列を $D_t$ で表すことにする．時刻 $t$ の観測 $d_t$ は過去の状態には依存せず，現在の状態 $x_t$ のみに依存するとし，カルマンフィルターを導入しよう．観測系列 $D_t$ における状態 $x_t$ のもっともらしさは，時刻 $t-1$（1 ステップ前）までの観測系列 $D_{t-1}$ から予測される状態 $x_t$ のもっともらしさと，状態 $x_t$ における観測 $d_t$ の起こりやすさの積であり，

$$p(x_t \mid D_t) = \eta \cdot p(d_t \mid x_t) \cdot p(x_t \mid D_{t-1})$$

と表せる．$p(x_t \mid D_{t-1})$ は，状態 $x_{t-1}$ から $x_t$ への遷移の確率と，時刻 $t-1$ における状態 $x_{t-1}$ の（観測系列 $D_{t-1}$ における）もっともらしさの積を集めた確率分布であることから，

$$p(x_t \mid D_{t-1}) = \int p(x_t \mid x_{t-1}) \cdot p(x_{t-1} \mid D_{t-1}) dx_{t-1}$$

となり，

$$p(x_t \mid D_1) = \eta \cdot p(d_t \mid x_t) \cdot \int p(x_t \mid x_{t-1}) \cdot p(x_{t-1} \mid D_{t-1}) dx_{t-1}$$

が得られる．なお，これまで「観測」と称した $d$ は

- ロボットのセンサから得られる「センサ観測データ」$z$（その観測系列を $Z$ で表す）
- ロボットのナビゲーションユニットから得られる「ロボットの移動量」$u$（その観測系列を $U$ で表す）

からなり，ロボット移動量は状態に依存しないこと，センサ観測データは状態に影響を与えないことを用いて，前式は

$$p(x_t \mid Z_t, U_t) = \eta \cdot p(z_t \mid x_t) \int p(x_t \mid u_1, x_{t-1}) \cdot p(x_{t-1} \mid Z_{t-1}, U_{t-1}) dx_{t-1}$$

と表される．さらに，これまで「状態」と称した $x$ は，

- 「地図」$m$
- 「ロボットの状態」$s$

からなる．地図 $m$ は時間とは独立であるため，最終的に

$$p(s_t, m \mid Z_t, U_t) = \eta \cdot p(z_t \mid s_t, m) \int p(s_t \mid u_t, s_{t-1}) \cdot p(s_{t-1}, m \mid Z_{t-1}, U_{t-1}) ds_{t-1}$$

が得られる．

上式は，観測データ系列が分かっていれば，もっともらしい地図とロボットの状態が得られることを示しているが，その計算のためには，$p(s_t \mid u_t, s_{t-1})$ と $p(z_t \mid s_t, m)$ を知る必要がある．前者は，時刻 $t-1$ でのロボットの状態と，時刻 $t$ で観測されたロボットの移動量から時刻 $t$ でのロボットの状態へと遷移する確率である．これはロボットの動作そのものを表し，時間とは独立であることから，シンプルに $p(s \mid u, s')$ と表現でき，モーションモデル（motion model）と呼ばれる．これはたとえばあらかじめ分かっているロボットの動作仕様から求められる．後者はある地図とロボットの状態のもとでのセンサ観測データの確率であり，これも時間とは独立であることから $p(z \mid s, m)$ で表現できる．これは知覚モデル（perception model）と呼ばれ，地図とロボットの状態からどのようにセンサ観測データが生成されるかを表し，これも何らかのモデルを与えておくことができる．

このように，自律移動ロボットは時々刻々と得られるセンサ観測データと自分の移動量から，地図と自分の状態を推定していくことができる．

図 -1　大規模地震対策総合訓練の様子
（豊中市の団地敷地内，2007 年）

## 災害現場における地図生成技術の必要性

地図情報は，市街地やスタジアム，地下街，団地敷地内（図 -1）などで予測不可能な災害ならびに大事故が発生した場合にも有用である．これは，救助にかかわる人員に対し，災害事故現場の状況（主に被災者の位置と状況）を人員間で共有することが災害時救命活動の課題とされていることからも分かる[3]．

ここで，現場地図と傷病者の位置が，救命従事者の端末や災害現場に設置された対策本部のシステムディスプレイに表示されるような災害時救命活動支援システムを考えてみる[4]．そのようなシステムに対して地図提供をする場合，やはり緊急時であることを想定し，運用を含めたさまざまな方法論を検討する必要があろう．

たとえば大学内や工場，線路の敷地内など，数百メートル四方ほどの領域内で発生する局所的な災害事故を想定する．そのような私有領域では汎用的な電子地図の需

図 -2　災害時救命活動支援システムの一部

要がそもそもないか，あるいは測定が許可されていないと思われる．つまり，地図が整備されているとは期待できない．また，細かい建造物が点在して複雑な地理形状となっていることも多く，災害や事故の影響で通過可能な経路が変化するかもしれないため，そもそも汎用の電子地図では用をなさないかもしれない．

衛星写真から建造物を推定する方法も考えられるが，やはり最新性という意味では問題がある．また，解像度の低い写真からは移動可能な領域の自動判定は難しく，電子地図データとするには人手による補助作業が必要となる．ただでさえ初期人員不足が指摘される災害発生現場では，そのような作業に従事できる人員の確保は現実的ではないだろう．

つまり，災害時では地図のオンデマンド自動生成が望ましいといえる．しかし，ロボット走行の困難さやコスト運用面から，災害現場におけるロボット地図生成は現実的ではない．ロボットと違い，人間は「移動量」の測定が難しく，「状態」（姿勢）も安定しない．したがって「センサ観測データ」の正確性に難があり，SLAM のような方法はそのままでは適用できない．一方で，「観測行為」は救命活動の中で人員が意識することなく，自動化されていることが省力化の点から望ましいといえる．

筆者は現在，科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業における研究課題「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」（代表：東野輝夫（大阪大学））のプロジェクトチームに所属している[4]．最近では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」が一般的になってきたが，同プロジェクトでは，順天堂大学病院救命救急センターなどと共同し，従来のトリアージにおける課題を解決し，医療活動を支援することを目標としている．その目的のため，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で集約し，災害現場本部で一括管理する（図 -2）とともに，無線ネットワークを用いた位置推定を行い，傷病者の位置を電子地図上に表示するシステムを開発している．

同システムでは，GPS を備え，IEEE 802.11 などによる無線ブロードキャストが可能な端末を医療従事者に持ってもらうことを前提としている．これには iPhone のような汎用的な携帯端末を想定しており，実現コストが抑えられるメリットがある．以下では，このように汎用的でシンプルな携帯端末のみを用い，消費電力やコスト，観測姿勢の制限などの点で不利となる専用センシング機器（レーザレンジセンサなどの測距装置）を用いることなく，医療従事者の救命活動（領域内移動）に伴い地図が自動生成されていく方法について述べる．

## モバイルノード間通信と GPS を用いた地図生成

以下では無線端末を保持する医療従事者をモバイルノードと呼ぶことにする．モバイルノードは GPS により取得した自身の位置情報をブロードキャストしながら，救命活動のために領域内を移動し続けていると仮定する．定期的に取得した位置情報は時刻とともに「移動履歴」として保持する．また，周辺のモバイルノードの位置情報ブロードキャストを受信した場合，自分と相手の位置情報と時刻を「通信履歴」として保持する．これらの履歴は適当なタイミングや方法でサーバに集約し，サーバはすべての移動履歴と通信履歴を用いて領域内の障害物の位置と形状を推定する．したがって，モバイルノードは測定のための特別なアクションをとる必要はないのが特長の 1 つである．

図 -3 に全体の流れを示す．「移動履歴」と「通信履歴」をそれぞれ個別に利用し，領域を分割した小セルごとに，障害物の有無に関する推定値（障害物が存在する可能性）を導出する．それらの結果を合成し，障害物が存在する領域を推定する．

移動履歴を時系列で接続したいわゆる予想移動経路上の小セルは，障害物が存在しないと想定される．それらのセルを，障害物なしを意味する白色にした結果を図 -3 (a) に示す．ただし，障害物が存在しない領域すべてをノードが移動するとは限らないため，障害物が存在しないにもかかわらず障害物と判定される場合が多くなると考えられる．そこで，画像処理技術の 1 つであり，膨張・収縮処理を繰り返し行う「クロージング」と呼ばれる処理を用いて，障害物が存在すると判定されたセルの周辺セルに障害物が存在しない場合は，そのセルにも障害物が存在しないと判定するように推定結果を修正した結果が図 -3 (b) である．

また一般に LoS（Line-of-Sight，直線の見通し）が確保できない環境ではパケット通信の成功率は低いため，建

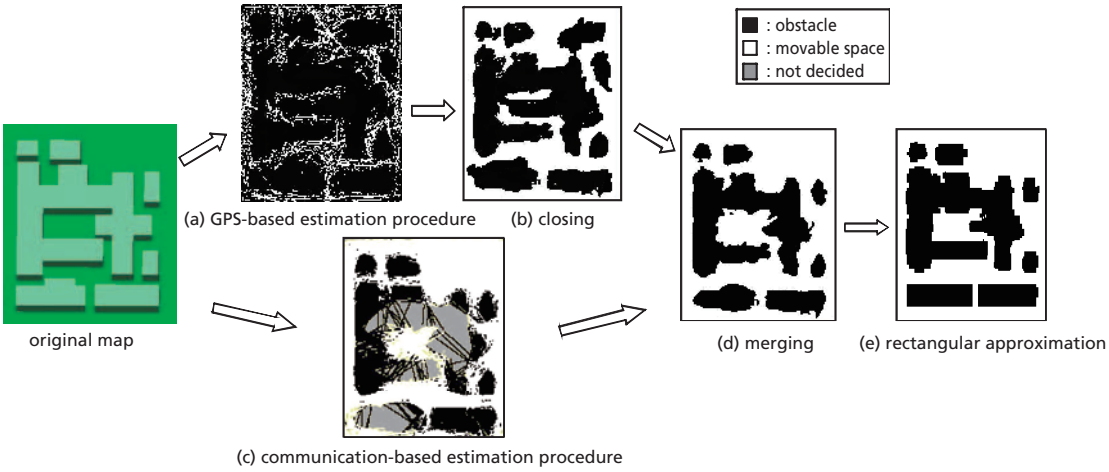


図 -3　移動通信履歴を用いた自動地図推定プロセス

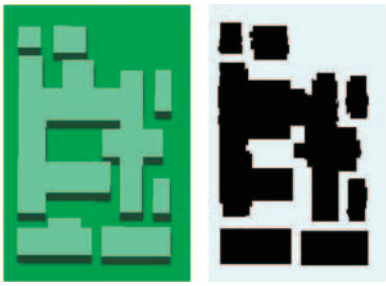

図 -4　実験領域（左図，大阪大学歯学部）と推定結果の一例（右図，最大無線到達距離 50m，GPS 誤差平均 5m の場合）

造物による遮蔽が存在する場合の見通し外通信が生じる確率はかなり低い．これにしたがって，通信が生じた 2 ノードの位置を結ぶ線分上のセルを白色にした結果を図 -3 (c) に示す．図 -3 (b) と図 -3 (c) の結果を合成し，画像処理を加えて目的の推定地図（図 -3 (e)）を得る．

上記の議論は誤差要因を無視しているが，通常は無視できない．誤差要因としては，(1) 位置情報の誤差，(2) 見通し外（Non Line-of-Sight, NLoS）通信の発生，がある．(1) は，GPS によるランダム誤差のほかに，建造物により GPS 衛星との LoS が遮蔽されることによる誤差も要因の 1 つである．たとえば一方に高い建造物があれば，同一方向の衛星の LoS がすべて遮られることになり，見通しのよい地点での GPS 誤差が平均 5m 程度の場合でも数十 m 程度まで悪化することもある．GPS ランダム誤差は回避できないことから，サンプリング回数を増やして確率的に判定することにしている．また LoS 遮蔽による誤差は，一定時間に人が移動できる距離を考慮し，極端にはずれた位置を示す GPS 値を除外することにより対応する．文献 5) では，GPS 実機を用いた実験を行い，この処理により精度がかなり改善されることを示している．(2) も同様に，実験に基づき NLoS 通信（貫通，反射および回折）の発生確率を IEEE 802.15.4 によるフィールド実験により求め，サンプリング回数を増やすことで確率的な判定を行う．

図 -4（左）のような大阪大学キャンパス内の建物を含む 150m × 190m の領域を対象とし，15 人程度が領域を移動するシナリオでシミュレーション実験を行った結果，図 -4（右）のようにかなり正答率の高い（セルの正答率が 85% 以上の）地図を 6 分間程度の履歴から生成することができた．技術詳細は文献 5) を参照されたい．

## 課題と今後の展望

自律移動ロボットを例に，従来のオンデマンド地図生成を紹介した．またオンデマンド地図生成の新たな応用として災害救命活動現場を考え，それに適したオンデマンド地図生成法を紹介した．この技術は人員による学習作業や測定作業を必要としない一方で，推定を無線通信に頼ることによる誤差拡大の危険性も孕んでいる．ただ，現場状況の把握にかかる人員の作業負担と，得られる情報の精度や詳細度はトレードオフにあることは自明であるので，現実システムにおけるよい「落としどころ」を探りつつ，より優れたオンデマンド地図技術の開発に引き続き努めていきたい．

**参考文献**

1) 内閣官房，地理空間情報活用推進会議，http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/
2) Thrun, S. : Robotic Mapping : A Survey, In Lakemeyer, G. and Nebel, B. editors, Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium, Morgan Kaufmann (2002).
3) 日本集団災害医学会尼崎 JR 脱線事故特別調査委員会，尼崎 JR 脱線事故特別調査委員会報告書 JR 福地山脱線事故に対する医療救護活動について，日本集団災害医学会 (2006).
4) 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，http://etriage.jp/
5) 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).

（平成 21 年 10 月 31 日受付）

山口弘純（正会員）
h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp
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．博士（工学）．平成 19 年より大阪大学大学院情報科学研究科准教授．平成 21 年より本会関西支部幹事およびモバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会幹事．