

GIS と SLAM 技術を利用した複数台ロボットの地図統合

Integrated Map Building in Multi-robot System using GIS and SLAM

秋山 英久^{1*} 竹内 栄二郎² 田所 諭² 下羅 弘樹¹ 野田 五十樹¹
Hidehisa Akiyama¹ Eijiro Takeuchi² Satoshi Tadokoro² Hiroki Shimora¹ Itsuki Noda¹

¹ (独) 産業技術総合研究所 情報技術研究部門
¹ Information Technology Research Institute, AIST
² 東北大学
² Tohoku University

Abstract: We propose a framework to build an integrated map using spatial information acquired by multiple mobile robots. In order to gather information from multiple robots effectively and to handle multiple coordinate reference systems dynamically, we adopt a common communication protocol, called MISP. And, we adopt a graph based SLAM method to optimize an integrated map. The proposed framework is tested with real rescue robots, in which our system shows effective integration of information acquired by multiple robots.

1 はじめに

震災やテロなどの災害時の情報収集は、減災および人命救助のための重要なタスクである。迅速な情報収集をより安全に行うために、人間に代わって遠隔操縦型探査ロボットに情報収集させることが期待されている。実際に救助活動を行うレスキュー隊員が利用する災害現場の環境地図を作成するためには、複数台のロボットが収集したデータを集約し、一つの地図として統合する必要がある。

本稿では、複数台ロボットが収集したセンサ情報に基づく統合地図の構築を目的とし、地理情報システム (GIS) を用いた情報の集約、及び、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 技術を利用した参照座標系変換による統合地図へのマッピングを行うフレームワークを提案する。

本稿は以下の構成を取る。2 節で GIS による情報集約について述べる。3 節で SLAM 技術を利用した参照座標系変換について述べる。4 節で実際のレスキューロボットを用いた実験について述べる。最後に、5 節でまとめとする。

2 地理情報データベースによる情報共有

複数台の探査用ロボットによる情報収集において、GIS は必要不可欠である。本稿で想定する探査用ロボットの主な役割は、効率的な救助活動を補助するための情報を収集することである。しかし、各ロボットは環境情報の断片しか提供しないため、それらの情報を集約するデータベースシステムが必要となる。災害情報では位置と時間の情報が重要であるため、それらを統合するデータベースシステムは GIS の一種である。データベースによって扱われる情報構造は、災害時に必要なさまざまな情報を表現できなければならない。また、複数台のロボットが収集する情報を GIS へ集約するために、共通の通信プロトコルが必要となる。さらに、統合地図作成のためには、複数台の移動ロボットが持つそれぞれの参照座標系を動的に扱えなければならない。以上の要件を満たすプロトコルとして、本稿では減災情報共有プロトコル (Mitigation Information Sharing Protocol : MISP)[2, 3] を採用する。

2.1 減災情報共有プロトコル

MISP は WFS (Web Feature Service)[7] に基づいた XML のプロトコルであり、WFS と関連する GML (Geography Markup Language)[8]、XML Schema などの各種標準を用いた柔軟性の高い仕様を備えている。既に標準化

*連絡先：(独) 産業技術総合研究所情報技術研究部門
茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
E-mail: hidehisa.akiyama@aist.go.jp

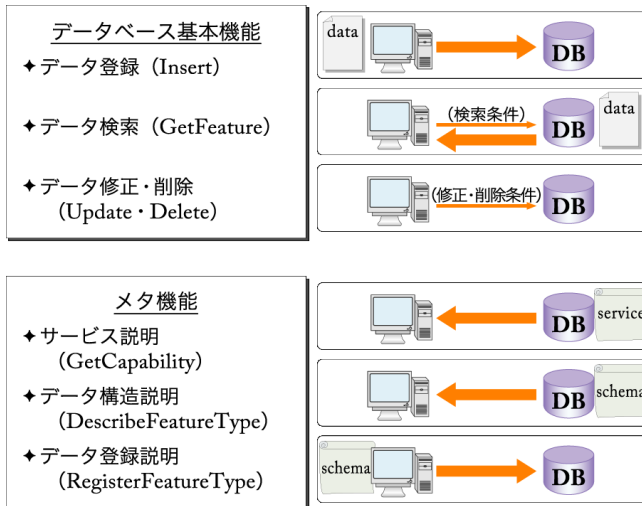


図 1: MISP の基本機能.

され広く使われている規格を採用することで、今後作成されるシステムとの互換性を高めることが目指されている。

MISP の基本機能を図 1 に示す。MISP によって、地理表現、時刻表現を構造化して柔軟に扱うことが可能となるだけでなく、データの入力、検索、修正、削除などの、一般的なデータベース管理システムで行われるデータ処理が可能となる。また、XML Scheme によってデータ形式を定義、登録することが可能であるため、災害時に必要となる情報を表現するためのデータ設計を動的に行うことができる。

2.2 DaRuMa

MISP サーバの実装の一つとして、地理情報データベースシステム DaRuMa (Database for Rescue Utility Management) の開発が進められている。本稿で開発する地図構築システムでは、情報を集約する GIS として DaRuMa を採用する。

DaRuMa は MySQL サーバと Java で実装されたミドルウェアで構成されている (図 2)。Java ミドルウェアは、通信処理、MISP と SQL の翻訳などを行う。DaRuMa はオープンソースソフトウェアとして開発されており、自由に利用可能である¹。

2.3 データ設計

移動ロボットが収集するセンサデータの情報は膨大であり、オンラインでの情報集約と地図生成を可能とするには、収集された情報量を何らかの方法で削減

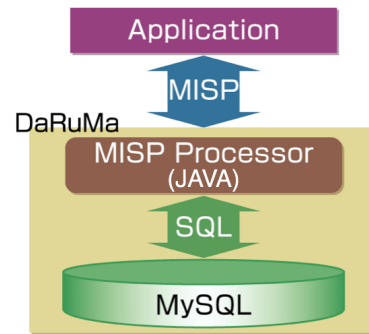


図 2: DaRuMa の構造.

または圧縮しなければならない。本稿では、ロボットが収集する情報を検索用メタデータとデータの実体とに分けて扱うことで、効率的なトランザクション処理を可能とする。また、観測されたデータの実体を既存フォーマットで扱うことで、データベースへの登録処理にかかるコストを削減する。

本稿では、ロボットが収集する環境情報として、測域センサで観測された点群データによる 3 次元形状を主に用いる。以下、これを 3 次元スキャンデータと呼ぶ。3 次元スキャンデータ以外にも、画像データなどのさまざまな情報を DaRuMa へ格納することが可能であるが、本稿では扱わない。

2.3.1 ロボットの位置姿勢の表現

本稿で扱う移動ロボットは起伏の大きい地形を走破することを想定している。そのため、ロボットの位置姿勢情報として、三次元位置座標 (X, Y, Z) 、および、オイラー角による姿勢情報 $(Roll, Pitch, Yaw)$ 、の 6 自由度の情報を用いる。ロボットの位置姿勢情報はジャイロオドメトリによって推定される。

推定された位置姿勢情報は、各ロボットが持つグローバルな参照座標系での値である。この参照座標系では、ロボットが起動した時点での位置を座標系の原点とし、ロボットが向いている方向を X 軸正方向、左手方向を Y 軸正方向、上方向を Z 軸正方向とする。ただし、観測データが DaRuMa へ登録される際は、常に新しい参照座標系のデータとして登録される。よって、観測ごとに新しい参照座標系が DaRuMa へ登録されることになる (図 3)。これによって、ある位置姿勢情報を任意の参照座標系へ、他の参照座標系とは独立に変換することが可能となる。

2.3.2 3 次元スキャンデータの表現

本稿では、点群データは単純な頂点情報の塊として扱い、点群の塊ごとにロボットの位置姿勢と関連付けて

¹<http://daruma.sourceforge.jp/>

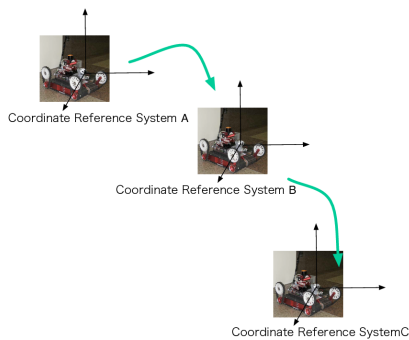


図 3: 観測データごとに異なる参照座標系.

データベースへ登録する方法を採用する。3次元スキャンデータに含まれる頂点情報は、測域センサデバイスからの相対位置座標として観測される。そのため、頂点情報を実際のロボット参照座標系の座標値として扱うには、観測された3次元スキャンデータとともに、対応するロボットの位置姿勢情報がデータベースへ登録されなければならない。3次元スキャンデータは、観測時点のロボットの位置姿勢に基づいた変換を施し、いずれかの参照座標系の座標値へ変換してから利用される。

移動ロボットとデータベースとの間で3次元スキャンデータを扱う際には、データベースへの頂点情報登録にかかるコストと、通信量と情報量のトレードオフを考慮しなければならない。本稿では、3次元スキャンデータに含まれる個々の頂点情報をデータベースへ登録せず、点群データを既存の3次元形状データフォーマットで表現する方法を採用する。3次元スキャンデータの情報を圧縮する方法として、DEM(Digital Elevation Map)、Voxelなどの方法がよく利用される。これらの方法は情報量の制御が容易であり、計算の高速さ、実装の容易さなどの利点がある。一方で、量子化による情報量の欠落によって、3次元形状マッチングの精度が著しく低下してしまう。

地図統合においては3次元形状マッチングの精度を優先することが望ましい。そこで、本稿では、相対値による点群データをPLYフォーマット²で表現し、観測された点群データをリソースが許す限りそのままの形で登録する方法を採用する。PLYフォーマットで表現された点群データは、既存の圧縮アルゴリズムで圧縮された後、Base64エンコードされた文字列としてDaRuMaへ登録される。

3 統合地図の生成

本稿で開発する地図構築システムでは、オドメトリによるロボット位置姿勢を修正し統合地図上へマッピン

グする方法として、グラフ修正法を用いる [4]。

3.1 グラフ修正法

グラフ修正法では、観測されたロボットの位置姿勢をグラフのノードとする。ノード間の関係がグラフのエッジとなる。本稿では、2つのノード間の相対位置関係とその誤差分散を拘束条件と定義する。誤差分散が大きいほど、位置姿勢情報の信頼性が低いことを意味する。この拘束条件は単方向であるため、グラフは有効グラフとなる。

ロボットの位置姿勢の修正を3次元形状マッチングのみで試みる場合、観測誤差などの影響のために、統合地図へのマッピングにおいて十分な精度が得られないことがある。これに対して、グラフ修正法では、あるノードに対して複数の拘束条件を付与でき、それらの拘束条件を考慮した修正を施すことが可能となる。さらに、グラフ修正法では、3次元形状マッチング以外のさまざまな拘束条件を与えられる。本稿で提案する地図構築システムでは、3次元形状マッチングに加えて、オドメトリによる推定位置と人間の観察に基づいた教示情報を拘束条件として利用する。

3.2 グラフ修正法のアルゴリズム

グラフ修正は以下の3ステップで実行される。

1. ノードの生成
2. 拘束条件の生成
3. ノード位置の最適化

ノード位置の最適化実行後、統合地図上へのマッピングに十分な精度が得られていない場合、修正されたノード位置を新たな入力としてステップ2と3を繰り返す。この繰り返し処理では新しいノードは生成されず、既存ノードの位置が修正されるのみである。

一方、ノード位置の最適化実行後に観測データが得られた場合、それに対応した新しいノードが生成される。これらの新しいノードに大して修正が必要であれば、ステップ2と3を実行する。

本稿で開発する地図構築システムでは、終了条件は機械的に判断されず、人間のオペレータによって判断されることを想定している。よって、ノード位置の最適化ステップの実行は、人間のオペレータによって決定される。

²<http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/ply/>

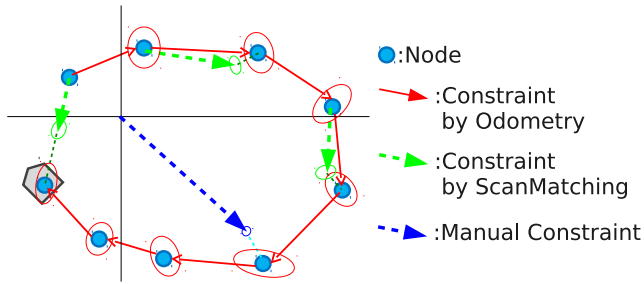


図 4: 拘束条件の例.

3.2.1 ノードの生成

2.3.1 節で述べたように、本稿ではロボットの位置姿勢として 6 自由度の情報を扱う。よって、ある時刻 t におけるノード $p(t)$ は、以下のように表される:

$$p(t) = (x, y, z, roll, pitch, yaw)^t$$

本稿では、オドメトリに基づいた位置姿勢の観測データを初期入力ノードとする。

観測された位置姿勢情報に加えて、参照座標系内の原点位置を特別なノードとして扱う。原点位置を表す特別なノード p_{origin} は、以下のようにすべての値が 0 のノードとして扱われる:

$$p_{origin} = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^t$$

これによって、ロボットによる観測データと既知のランドマーク物体とをノードの接続関係として関連付けることができる。

3.2.2 拘束条件の生成

本稿で扱う拘束条件は、以下の 3 種類に分類される。

- オドメトリによる拘束条件
- 3次元形状マッチングに基づく拘束条件
- 人間の観察に基づく教示情報による拘束条件

拘束条件は任意の時点で追加/削除することができる。図 4 に拘束条件の例を示す。各拘束条件の詳細は 3.3 節で説明する。

3.2.3 ノード位置の最適化

ノード位置の最適化では、与えられた拘束条件に対してノード位置の同時確率を最大化するようなノード位置の変位量を求める。これは、巨大な連立方程式を解く問題として帰着される [4]。

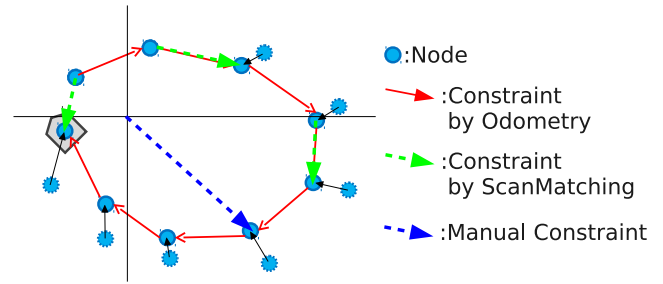


図 5: 最適化実行後のノード位置の変化.

推定したロボットの位置姿勢情報に対して一定の傾向で誤差が混入された場合や、あるノードを中心として全ノードを単純に回転させるような変換が要求される場合、少数の拘束条件を与えるだけでグラフ修正法によって統合地図として十分な精度を得られる。

3.3 使用する拘束条件

本稿で使用する 3 種類の拘束条件について述べる。

3.3.1 オドメトリによる拘束条件

ロボットが推定した位置姿勢情報に基づいてノード間の相対的な位置関係を定義する。DaRuMa へ登録されたデータ、または、修正後のノード位置情報を用いる。この拘束条件は、時間的に連続したノード間でのみ生成される。時間的に古い方のノードを原点とする参照座標系において、もう一方のノードの相対的な位置姿勢を求めることで拘束条件が得られる。通常、オドメトリによる拘束条件では誤差分散を大きめに設定しておく。

3.3.2 3次元形状マッチングによる拘束条件

3次元形状マッチングによって、ノードの位置関係を修正することができる。3次元形状マッチングでは、参照ノードと入力ノードの任意のペアを選択し、形状マッチングを行う。形状マッチング手法として、Iterative Closest Point (ICP) や Normal Distribution Transform (NDT) などが知られている。いずれも、異なる時刻で計測した三次元形状の適合具合を示す評価関数を用意し、評価関数を最大化または最小化する座標変換パラメータを推定する手法である。推定は繰り返し計算で行われるため、計算コストは一般に大きくなる。本稿では、実行速度で優位な NDT を採用する。

3次元形状マッチングによる拘束条件では、参照ノードを原点とする参照座標系において、修正された入力

ノードの位置姿勢を求めることで相対的な位置関係を得る。

3次元形状マッチングは任意のノード間で実行可能である。しかしながら、実用上、すべての組み合わせでの形状マッチングをオンラインで実行することはできない。本稿で開発する地図構築システムでは、時間的に連続なノード間では自動で形状マッチングを行い、それ以外の組み合わせでの形状マッチングは人間のオペレータが選択実行する。

3.3.3 人間の観察に基づく教示情報による拘束条件

参照用の地図データが利用可能である場合、その特徴に合わせてノードの位置合わせを行うことで、統合地図の精度を大きく向上させることができる。また、オドメトリや3次元形状マッチングで十分な精度が得られなかった場合に、人間の観察に基づいて修正を加えることで統合地図の精度の低下を防ぐことができる。

人間がマニュアル操作で与える拘束条件は、統合地図におけるグローバル参照座標系に対する位置姿勢として与えられる。よって、 p_{origin} を仮想的に設定し、ロボットが観測したいいずれかのノードを p_{origin} に対して関連付けることで、ロボット参照座標系を統合参照座標系へマッピングすることができる。

本稿では、参照用地図データと人間の観察の信頼性は高いと想定し、マニュアル入力による拘束条件では誤差分散を極めて小さく設定する。

4 実ロボットによる実験

提案する地図構築システムを用いて、実ロボットが観測した3次元スキャンデータによる統合地図を生成する実験を行った。

4.1 実験設定

2台のロボットを無線操作し、建物内の複数階を走破させる。使用したロボットは、共同研究機関である東北大学、千葉工業大学などが開発する Kenaf と Quince である。各ロボットは常時3次元スキャンデータを収集しており、時刻、位置姿勢情報などのメタデータとともに定期的に3次元スキャンデータを DaRuMa へ登録する。一回に登録される点群データは5万~10万個程度で、登録の時間間隔は5~10秒である。各ロボットが収集するデータは、ロボットから直接 DaRuMa へ、あるいは、ロボットの操作 PC 経由で DaRuMa へ送信される。

ロボットから DaRuMa へ登録されたデータは専用のビューワプログラム darumaviewer によって取り出され

る。darumaviewer は、人間の観察に基づく拘束条件を入力するためのインタフェースとなる。darumaviewer によって取り出される3次元スキャンデータに対応するロボットの位置姿勢情報は、観測された生データである。darumaviewer は外部の SLAM プログラムと通信し、グラフ修正による参照座標系変換情報を生成する。実験では、参照用データとして建物の図面を利用した。図面を画像データとして darumaviewer へ取り込み、3次元スキャンデータによる特徴との対応を人間のオペレータの観察によって判断する。

4.2 実験結果

2台のロボットによる統合地図生成の例を図6と図7に示す。図6は2台のロボットの移動経路を2次元平面上に投影した様子である。図7は、移動経路に加えて点群データを3次元表示した様子である。図に示すように、2台のロボットが観測した3次元スキャンデータによる統合地図を生成することで、周囲の3次元形状を認識できるようになることが分かる。

5 まとめ

本稿では、GISによる情報集約のためのプロトコル設計、SLAM技術を利用した参照座標系変換によって、複数台の移動ロボットが収集する3次元スキャンデータから統合地図を生成するフレームワークを提案した。フレームワークを実現した地図構築システムを用いた実験を行い、実ロボットによる統合地図生成に成功した。

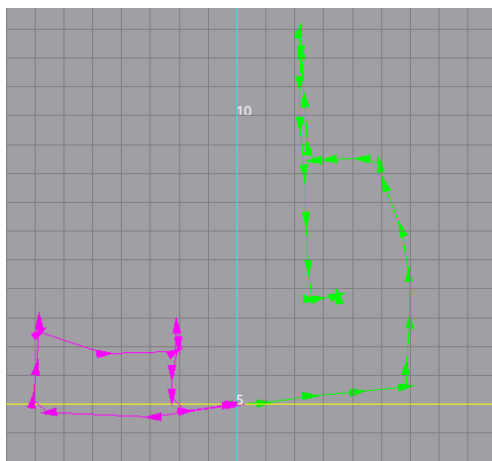
今後の課題として、人間のオペレータによる作業を支援するための半自動化、3次元スキャンデータのより効果的な視覚化などの改善が必要である。

謝辞

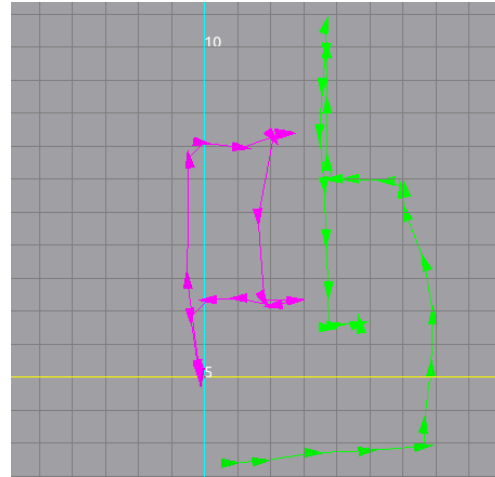
本研究は、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト 被災建造物内移動 RT システム（特殊環境用ロボット分野）閉鎖空間内高速走行探査群ロボットによる研究助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Itsuki Noda et. al: DaRuMa: Disaster Mitigation Information Sharing System and Integration of Rescue Information Systems, *Proc. of SI-2007*, (2007)

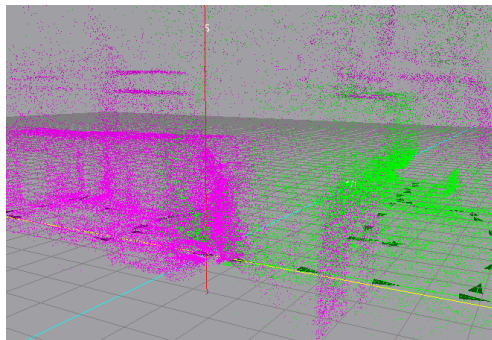


(a) 生データ.

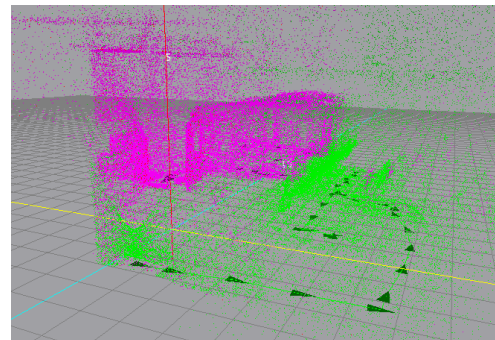


(b) 最適化実行後のデータ.

図 6: 3次元スキャンデータによる統合地図生成の例 (ロボットの移動経路の2次元表示)



(a) 生データ.



(b) 最適化実行後のデータ.

図 7: 3次元スキャンデータによる統合地図生成の例 (点群データの3次元表示)

- [2] Itsuki Noda, Yasushi Hada, Jun-ichi Meguro, and Hiroki Shimora: Information Sharing and Integration among Rescue Robots and Information Systems, *Proc. of IROS2007 Full-Day Workshop MW-3 (Rescue Robotics)*, pp. 125-139 (2007)
- [3] Itsuki NODA: Communication Protocol and Data Format for GIS Integration, *Proc. of the 2nd International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, pp. KRW-058, (2005)
- [4] E.Takeuchi and T.Tsubouchi: Multi Sensor Map Building based on Sparse Linear Equations Solver, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2511-2518, 2008.
- [5] 下羅弘樹, 秋山英久, 野田五十樹: 移動ロボット群のための動的座標変換データベース管理システム, 人工知能学会 第8回社会におけるAI研究会予稿集, (2009)
- [6] 大野和則, 竹内 栄二郎, 坪内 孝司: 投光型距離センサを用いた三次元SLAM, *日本ロボット学会誌, Vol.26 No.04*, pp.6-9, (2008)
- [7] Open GIS Consortium, Inc.: *Web Feature Service Implementation Specification (OGC-02-058)*, ver.1.0.0 edition, http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=7176, (2002)
- [8] Open GIS Consortium, Inc.: *OpenGIS Geography Markup Language(GML) Implementation Specification (OGC-02-023r4)*, ver.3.00 edition, <http://www.opengis.org/docs/02-023r4.pdf>, (2003)