

GIS に集約された点群情報を用いた環境地図構築システム

A Map Construction System using Point Clouds Integrated in GIS

秋山 英久*¹ 下羅 弘樹*² 野田 五十樹*²

Hidehisa Akiyama

Hiroki Shimora

Itsuki Noda

*1 (独) 産業技術総合研究所 情報技術研究部門

Information Technology Research Institute, AIST

This paper describes our map construction system that uses a geographic information database system, DaRuMa. In order to integrate sensor data from several mobile rescue robots, we introduced a framework to transform coordinate reference systems dynamically and proposed a data structure to deal with vast sensor data. In the experiments, we showed our system can generate suitable integrated maps and can deal with vast sensor data online.

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。情報収集時の二次被害を避け、救助活動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。ロボットが収集する情報にはさまざまな種類があり、また、より詳細で最新の情報を得るためには大量のセンサデータを扱わなければならない。さらに、収集したデータに基づいて、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必要がある。

本研究では、地理情報データベースシステム DaRuMa (DAtabase for Rescue Utility Management) を用いて、複数ロボットが収集するさまざまな情報をデータベースへ集約し、それらデータに基づいて環境地図を構築することを目的としている。複数ロボットが収集した情報を集約し、ひとつの環境地図へと統合するには、以下の技術的問題が挙げられる：

- 情報集約
- データ量の削減
- 誤差修正
- ロボット間の位置合わせ

我々は、複数ロボットが収集した情報を地理情報システム (Geographical Information System : GIS) へ集約し、さらに GIS と外部の位置合わせプログラムを連携させることでこれらの問題を解決した。本稿では、建物内などの閉鎖空間内において複数ロボットが取得する 3 次元スキャン情報の効率的な収集を目的としたデータ表現、GIS 上の座標変換フレームワークを用いた環境地図構築システムの実装、および、それらの有効性を検証した実証実験について述べる。

2. 地理情報データベースシステムによる情報共有

本稿で想定する探査用レスキュー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。

連絡先: 秋山英久, (独) 産業技術総合研究所, 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1, 029-862-6517, hidehisa.akiyama@aist.go.jp

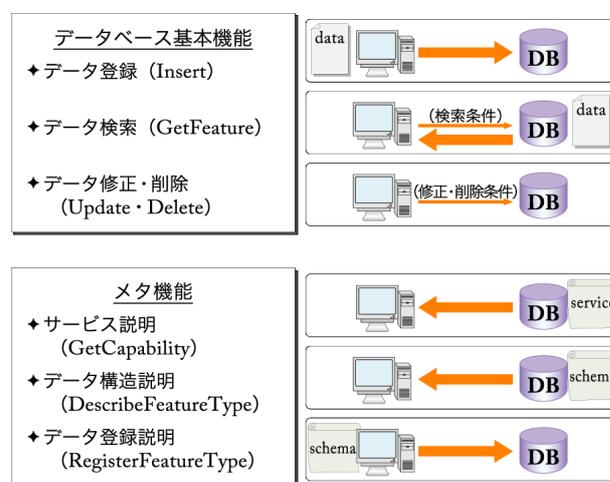


図 1: MISP の基本機能.

探査ロボットは情報の断片しか提供しないため、情報を蓄え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り、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、複数の移動ロボットが持つそれぞれの座標系を変換する情報を動的に扱えなければならない。

2.1 減災情報共有プロトコル

我々の地図構築システムでは、上記の要件を満たす通信プロトコルとして、減災情報共有プロトコル (Mitigation Information Sharing Protocol : MISP) を採用した [Noda 07b]。MISP は WFS (Web Feature Service) 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)、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。MISP では、既に標準化され広く使われている規格を採用しており、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 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も可能となる(図1)。さらに、XML Schemeによってデータ形式を動的に定義、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柔軟なデータ設計が可能となっている。

2.2 座標系変換

MISPの基本機能に加えて、座標系変換情報を扱うための仕様拡張が進められている[下羅09]。この拡張により、座標系変換情報を動的に扱うことが可能となる。この拡張では、複数ロボットがそれぞれに持つ座標系をデータベース上で後から補正できるように、データと座標系の定義を独立にデータベースへ登録することが想定されている。すなわち、センサデータをデータベースへ登録する際は、ある座標系を指定して登録し、座標系間の関係は座標系変換情報として登録される。データベースからセンサデータを取り出す際は、座標系変換情報が適切に登録されていれば、指定した座標系へ自動的に変換されたデータが取り出される。

2.3 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(Data base for Rescue Utility Management)が開発されている*1。我々の地図構築システムでは、情報を集約するGISとしてDaRuMaを用いた。

3. データ設計

3.1 検索用メタデータの利用

MISPでロボットのセンサデータを定義する際のガイドラインとして、検索効率を上げるためにデータの实体と検索のキーとなる要素を個別に定義することが推奨されている[Noda 07b]。例えば、画像のような一つのデータサイズが大きい情報を扱う場合、データベース上で検索するたびにデータの实体を処理しては計算リソースを無駄に消費してしまう。データを取得した時刻、位置、ロボット名、などを検索用メタデータとして登録し、データの实体は別途登録することで、検索時のリソース消費を避けることができる。

3.2 3次元スキャンデータの表現

環境地図構築において、ロボットの周囲の形状を知ることができる3次元スキャンデータは重要な情報である。3次元スキャンデータは点群として表現できるため、それらの点ひとつひとつを検索可能な状態でデータベースへ登録することが可能である。しかしながら、物体の形状の精度を上げるにはより多くのデータが要求されるため、形状の精度とデータベースへオンライン登録できる情報量とのトレードオフが発生する。実際の運用では、一度に登録される3次元スキャンデータは数万~数十万個の点群で構成されるため、データベースへのオンライン登録は困難である。そこで、何らかの方法で点群を圧縮する工夫が必要となる。我々は、DaRuMaへ登録する3次元スキャンデータのデータ量を削減するために、点群データを以下の2つの形式で表現する方法を採用した。

- DEM(Digital Elevation Map) フォーマット。
- 既存の3次元形状モデルデータフォーマット。

3.2.1 DEMによる表現

3次元スキャンデータをDEMで表現する場合、ロボットとDaRuMaの間では、グリッドマップでデータをやりとりする。各グリッドにはスキャナによって観測された高さの情報が含まれる。あるグリッドのデータが観測されなかった場合、そのグリッドにはデータが存在しないことを意味する不正値が入られる。グリッドマップは常に2次元の座標系で扱われ、データがDaRuMaへ送信される時、送信元のロボットはグリッドマップの中心に位置する。グリッドマップの座標軸は、データが送信される時のロボットの姿勢に対して相対とし、ロボットの向きをX軸正方向、左手方向をY軸正方向とする。グリッドマップの移動と回転の情報は、ロボット自身の座標系の原点からのアフィン変換としてデータに付加され、グリッドマップと同時にDaRuMaへ登録される。

DEM形式の利用は2次元地図の生成に適している。また、生の3次元スキャンデータのデータ量に応じてグリッドサイズを変更できるなど、データ圧縮のための柔軟性が高いという利点がある。

3.2.2 既存フォーマットによる表現

3次元地図の生成を目的とする場合、DEM形式では物体の形状を十分に表現できない。そこで、形状の精度が求められる場合は、既存の3次元形状モデルデータフォーマットを利用することでより柔軟に3次元形状データを扱う方法を採用した。汎用の3次元形状モデルデータフォーマットを採用することで、既存の3次元モデルデータを扱うソフトウェアの利用が期待できる。また、点群データから任意の形状データへの変換処理を施した状態でDaRuMaへ登録することも容易となる。

我々のシステムでは、3次元形状モデルデータフォーマットとして、DXF*2やPLY*3などのフォーマットを採用している。これらのフォーマットは点群データとは別に任意の数値情報を含めることが可能であるなどの冗長性を有しており、ロボットの位置姿勢、座標変換情報などをデータ内へ埋め込むことで、データの実体単体でも扱いやすくなる。

3次元形状データを利用する場合、一度に登録されるデータ量が大きくなることが予想されるため、検索用メタデータとデータの実体を分けてDaRuMaへ登録する。

4. 統合地図の生成

4.1 位置合わせプログラムとの連携

ロボットが取得するセンサ情報は、そのセンサ情報を取得した時刻のロボットの位置あるいはセンサデバイスの位置を座標系の原点とした相対値で計測されるものが多い。例えば、レーザーレンジファインダを用いた計測では、センサから対象物体までの距離を測ることで周囲の3次元形状を点群データとして取得することができる。これらの点群データを地図で利用するには、観測時点のロボットまたはセンサデバイスの位置姿勢に基づき、全体で統一したある座標系へ変換しなければならない。この座標系統合の際、ロボットの自己位置推定の誤差により、観測値と実際の値との間にずれが生じる。通常、ロボットの正確な位置姿勢を知ることが技術的に困難である。このずれを修正するために、ロボットの自己位置推定と地図作成を同時に行うSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術の研究が盛んに行われている[Thrun 03, Howard 06]。

*2 CADソフトウェアで標準的に採用されているフォーマット。
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?siteID=123112&id=12272454&linkID=10809853>

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

*1 <http://daruma.sourceforge.jp/>

本研究で開発する環境地図構築システムでは、外部のSLAMソフトウェアとDaRuMaとの間で座標系変換情報をやりとりすることで、統合地図を自動あるいは半自動で生成する。

4.2 環境地図構築システム

図2に開発している環境地図構築システムの概要を示す。参照用地図として建物のCADデータを入手可能である場合は、CADデータをDaRuMaへ事前に格納しておく。各ロボットは3次元スキャンデータ、カメラ画像、要救助者の情報などをそれぞれの座標系でDaRuMaへ登録する。外部のSLAMソフトウェアはDaRuMaから3次元スキャンデータを取り出し、位置合わせを行った上で、座標系変換情報をDaRuMaへフィードバックする。

我々が開発しているビューワプログラムは複数台ロボットの独自座標系に対応しており、生データまたは特定の座標系へ変換したデータのいずれかをDaRuMaから取り出し、視覚化することができる。また、ビューワプログラム上で座標系変換情報を人手で編集し、DaRuMaへフィードバックすることも可能である。通常の地理座標系でのデータ検索が可能な場合は、Google Earthなどの既存の地図ソフトウェア上でのデータ表示も可能である。

5. 実証実験

本研究の地図構築システムを実際のロボットと統合し、実環境におけるロボットの実用化へ向けて、RoboCup Rescue 競技会および米国の災害訓練施設であるDisaster Cityにて実証実験を行った。この実証実験において、本研究のシステムを実際のロボットと連動して動作させ、実用的な性能を得られるかを確認した。

5.1 使用したロボットおよびセンサデバイス

使用したロボットは、プロジェクトの共同研究機関である千葉工業大学などが開発するKenafである。このロボット上にレーザーレンジファインダ、カメラなどの各センサデバイスが搭載されており、それらのデバイスから取得した情報がDaRuMaへ登録される。

5.2 実験1 RoboCup Rescueにおける2次元地図生成

実験において、以下の情報をDaRuMaへ登録した。

- ロボットの位置姿勢
- 3次元スキャンデータ (DEM形式)
- 要救助者の位置、発見日時、カメラ画像データ

登録するDEMデータのグリッド数と大きさは、以下の設定を用いた。

- グリッドの数: 100 × 100
- 1グリッドの大きさ: 5cm × 5cm

DaRuMaに登録された情報はビューワプログラムで取得、視覚化し、最終的にGeotiffとして出力する。外部のSLAMソフトウェアへDEM形式の3次元スキャンデータを渡し、座標系変換情報を受け取ることで、ビューワプログラム上で統合地図を生成する。要救助者の位置修正は、データを登録した時間のもっとも近いDEMデータの座標変換を参照して行う。

実験の結果、三台のロボットが登録したDEMデータに対して位置合わせを実行し、統合地図を生成することに成功した。結果の例を図3に示す。

5.3 実験2 Disaster Cityにおける次元地図生成

この実験では複数台ロボットによる統合地図生成は行わず、可能な限り詳細な3次元スキャンデータを一台のロボットからDaRuMaへ登録する負荷テストを目的とした。実験において、以下の情報をDaRuMaへ登録した。

- ロボットの位置姿勢
- 3次元スキャンデータ (PLY形式)

ロボットの位置姿勢情報は1秒ごとにDaRuMaへ登録される。3次元スキャンデータはロボットが2m移動するごとに、その間に観測した点データをまとめてDaRuMaへ登録する。ただし、一度に登録する点データの個数は約10万個に制限した。これは、DaRuMa側のリソース不足のためではなく、ロボットと操作用コンピュータとの間の無線通信の帯域を圧迫しないように設定した制約である。

実験の結果、数百万個の点データをオンラインでDaRuMaへ登録し、ロボットの移動経路と合わせてビューワプログラム上でほぼ遅延無く表示することに成功した。得られた3次元スキャンデータの一例を図4に示す。

6. まとめ

本稿では、遠隔操縦型レスキューロボットと地理情報データベースシステムDaRuMaを用いた環境地図生成システムについて述べた。実験によって、我々のシステムによって有効な環境地図生成が期待できることが示された。今後の課題として、人間のオペレータに対するより効果的な視覚化を実現し、環境地図としての有効性を高める必要がある。

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によって行われた。

参考文献

- [Noda 07b] 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)
- [Thrun 03] Sebastian Thrun et.al: Simultaneous Localization and Mapping with Sparse Extended Information Filters, *International Journal of Robotics Research*, vol.23, no.7-8, pp. 693-716, (2004)
- [Howard 06] Andrew Howard: Multi-robot Simultaneous Localization and Mapping using Particle Filters, *International Journal of Robotics Research*, vol.25, no.12, pp. 1243-1256, (2006)
- [下羅 09] 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)

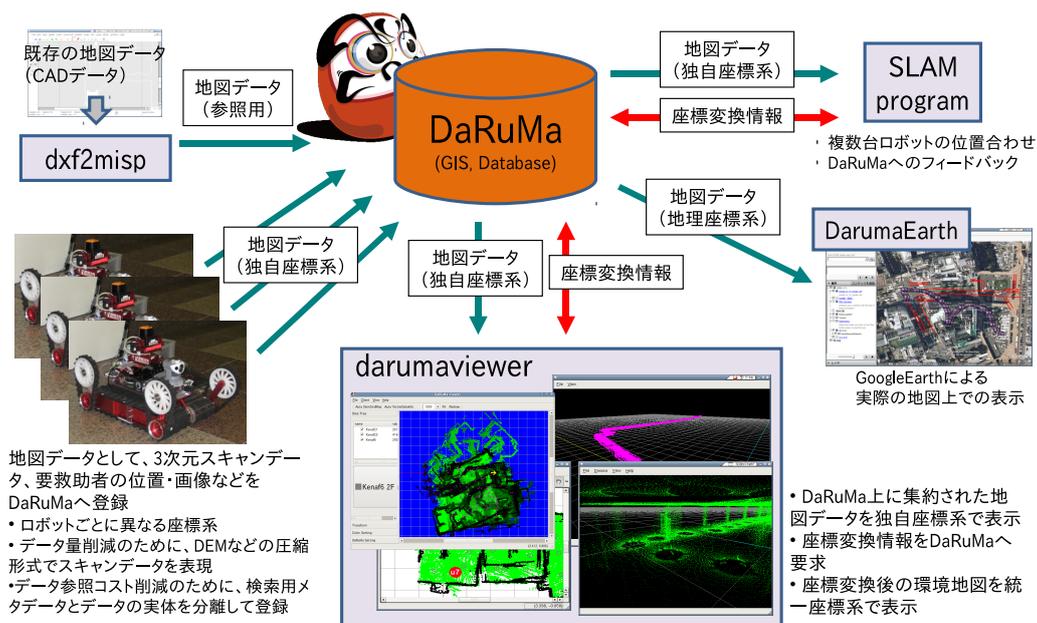


図 2: 環境地図構築システムの概要.

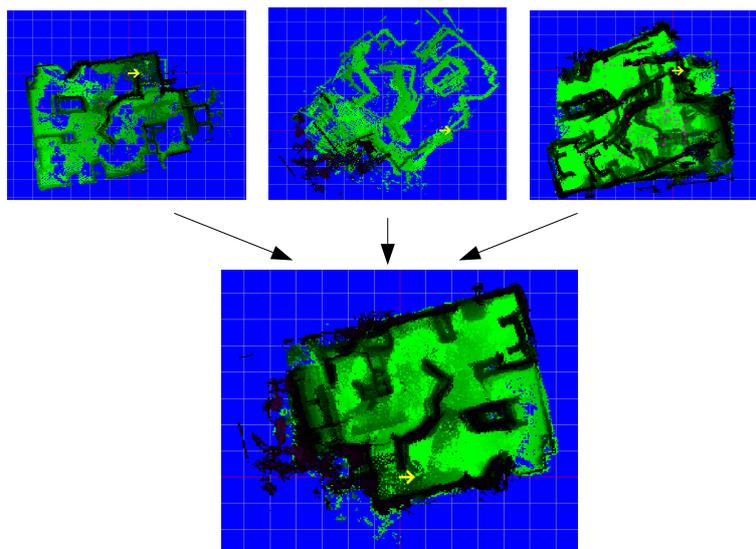


図 3: 3 台のロボットによる統合地図生成.

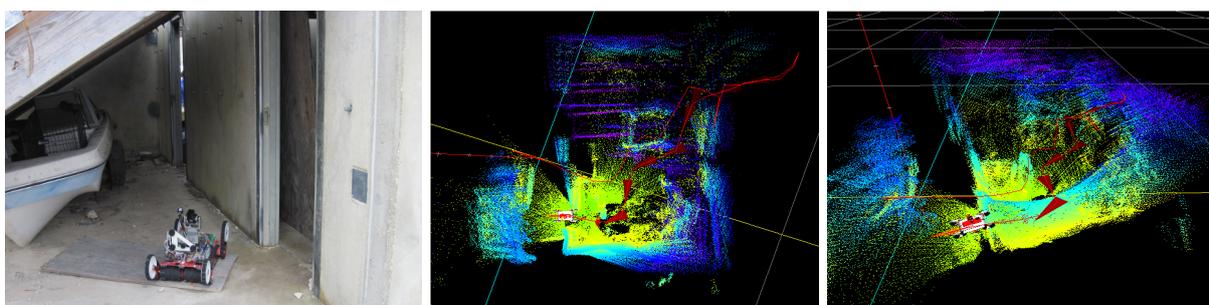


図 4: Disaster City における 3 次元地図生成.