

地理情報データベースシステム DaRuMa を用いた環境地図構築システム

A Map Generation System using Geographic Information Database System DaRuMa

秋山英久 下羅弘樹 野田五十樹

Hidehisa AKIYAMA, Hiroki SHIMORA, Itsuki NODA

独立行政法人 産業技術総合研究所 情報技術研究部門

Information Technology Research Institute, AIST

{hidehisa.akiyama, h.shimora, I.Noda}@aist.go.jp

Abstract

This paper describes our map generation 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 map and can deal with vast sensor data online.

- 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、複数ロボットからの情報を地理情報システム (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。

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。しかしながら、人間による情報収集作業は二次被害を発生させる危険がある。このような状況に対して、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、複数ロボットが取得するさまざまな情報をデータベースへ登録し、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

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。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るため、それらを統合するデータベースシステムは地理情報システム (Geographical Information System: 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[2, 3]。

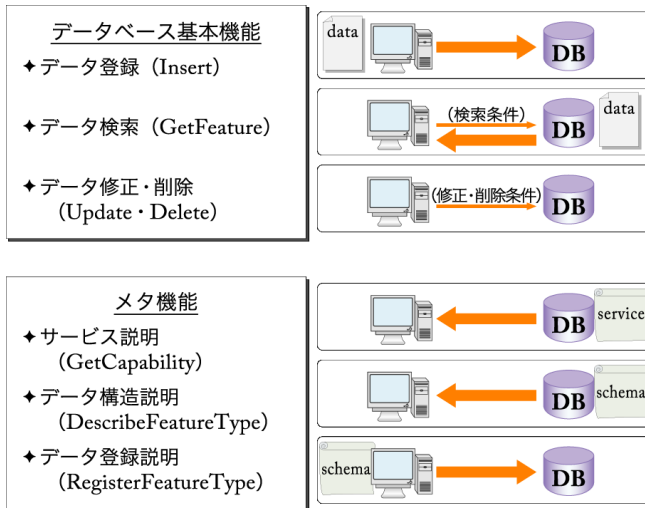


Figure 1: MISP の基本機能.

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. 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 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も可能となる. 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[6]. 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. 現在のモデルでは, 複数台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. 例えば, センサデータを取得するごとに新しい座標系を作成し, センサデータ取得位置を原点として座標系として登録することが可能である(図 2). センサデータごとに座標系を独立させることで, センサデータごとに位置のずれを修正することも可能である. これは, ロボットの自己位置推定の誤差が大きい場合に有効である. 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,

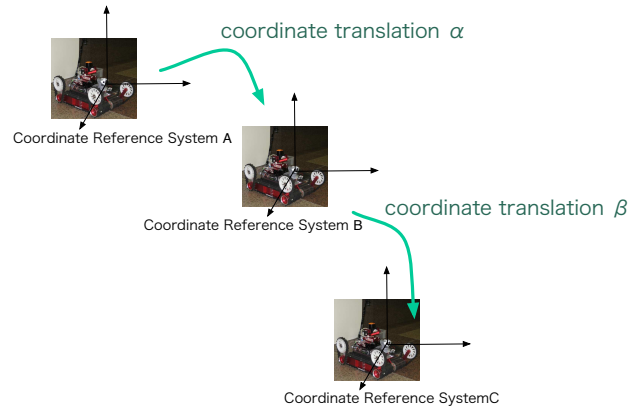


Figure 2: 座標と座標系変換.

```
<misp:RegisterCoordinateSystemTransformation
  xmlns:misp="http://www.infosharp.org/misp">
  [<misp:Transformation>
    <misp:identifier>URI of this transformation</misp:identifier>
    <misp:sourceCS>name of source coordinate system</misp:sourceCS>
    <misp:targetCS>name of source coordinate system</misp:targetCS>
    <misp:transformationMethod>
      <misp:AffineTransformation>
        <misp:sourceDimensions>
          dimensions of source coordinate system
        </misp:sourceDimensions>
        <misp:targetDimensions>
          dimensions of target coordinate system
        </misp:targetDimensions>
        <misp:parameters>
          affine transformation parameters
        </misp:parameters>
      </misp:AffineTransformation>
    </misp:transformationMethod>
  </misp:Transformation>]*
</misp:RegisterCoordinateSystemTransformation>
```

URI of this transformation : unique name to refer this transformation
name of source coordinate system : unique name of source coordinate system
name of target coordinate system : unique name of target coordinate system
dimensions of source coordinate system : integer number of source coordinate system
dimensions of target coordinate system : integer number of target coordinate system
affine transformation parameters : list of real number separated by white space

Figure 3: RegisterCoordinateSystemTransformation のフォーマット.

指定した座標系へ自動的に変換した結果が取り出される.

座標系変換情報は, RegisterCoordinateSystemTransformation コマンドによってデータベースへ登録される. 図 3 に座標系変換情報のフォーマットを, 図 4 に座標系変換情報の例を示す. この例では, urn:misp:example:table1 座標系から, urn:misp:example:room1 座標系への二次元のアフィン変換情報を登録している.

2.3 DaRuMa

我々は, 情報を集約する GIS として, MISP の実装の一つである地理情報データベースシステム DaRuMa(DAbase for Rescue Utility Management) を開発している. 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 5). 図に示すように, 通信処理や MISP と SQL の翻訳は Java で実装されたミドルウェ

```

<misp:RegisterCoordinateSystemTransformation
  xmlns:misp="http://www.infosharp.org/misp">
  <misp:Transformation>
    <misp:identifier>urn:misp:example:table1-to-
room1</misp:identifier>
    <misp:sourceCS>urn:misp:example:table1</misp:sourceCS>
    <misp:targetCS>urn:misp:example:room1</misp:targetCS>
    <misp:transformationMethod>
      <misp:AffineTransformation>
        <misp:sourceDimensions>2</misp:sourceDimensions>
        <misp:targetDimensions>2</misp:targetDimensions>
        <misp:parameters?
          1 2 3
          4 5 6
        </misp:parameters>
      </misp:AffineTransformation>
    </misp:transformationMethod>
  </misp:Transformation>
</misp:RegisterCoordinateSystemTransformation>

```

Figure 4: 座標系変換情報の例.

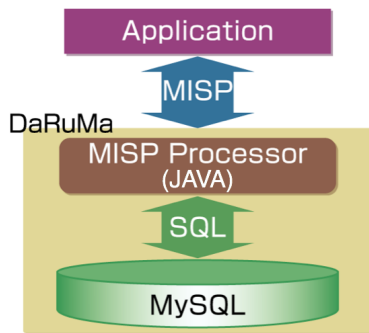


Figure 5: DaRuMa の構造.

アが行う。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。

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実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[3]。例えば、カメラ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実体を処理しては計算リソースを無駄に消費してしまう。カメラ画像を取得した時刻、位置、カメラデバイス名、画像データの固有名などを検索用データとして登録した上で、カメラ画像の実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。点データを個別に扱った場合、DaRuMa が処理できるデータ量は1秒あたり1000個程度となる²。レーザーレンジファインダによって得られる点データの数は最大で1秒あたり7000個を越え、さらに、実際の運用では複数台のロボットが同時に情報を送信するため、リソースが不足し、データを処理しきれなくなる。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し、まとめて処理できるよう工夫が必要となる。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、以下の2つの方法を採用した。

- 3次元スキャンデータをDEM(Digital Elevation Map)形式で表現する。
- 3次元スキャンデータを既存の3次元形状モデルデータフォーマットで表現する。

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れられる。各ロボットはグリッドマップ上のデータがたまるとDaRuMaへデータを送信する。グリッドマップそのものは常に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サイズ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、本稿では、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

² CPU:Core Duo 1.6GHz, Memory: 1GB, OS: Linux のノートPC上で計測。

¹ <http://daruma.sourceforge.jp/>

でより柔軟に 3 次元形状データを扱う。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。

本稿では、3 次元形状モデルデータフォーマットとして、DXF³ や PLY⁴ のような冗長性の高いフォーマットを採用している。これらのフォーマットで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ため、ロボットの位置や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 次元形状データは、カメラ画像などと同様に検索用メタデータとデータの実体とを分けて 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は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 [4, 5]。

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 6 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。

³ 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>

⁴ <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/ply/>



Figure 7: 探査用ロボット Kenaf.

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

「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」にて、本研究のシステムを実際のロボットと統合し、動作させた。このプロジェクトにおいて、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 にて実証実験が行った。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 (図 7) 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

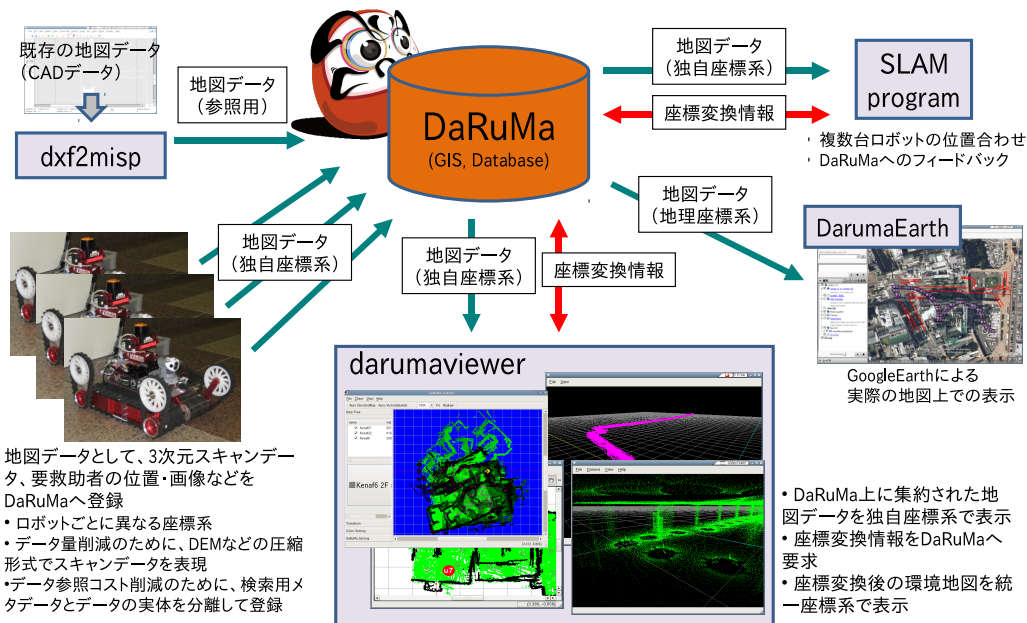


Figure 6: 環境地図構築システムの概要.

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がもっとも近い 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 8 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 9 に示す。

6 まとめ

本稿では、遠隔操縦が田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、3 次元スキャンデータからの特徴抽出が考えられる。特徴抽出によって冗長なデータを削減することで、人間に対するより効果的な環境の視覚化を実現するだけでなく、通信量の削減や SLAM ソフトウェアなどとの連動の効率化が期待できる。

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

- [1] Itsuki Noda et. al: DaRuMa: Disaster Mitigation Information Sharing System and Integration of Rescue Information Systems, *SI-2007, 2A4-2* (2006)

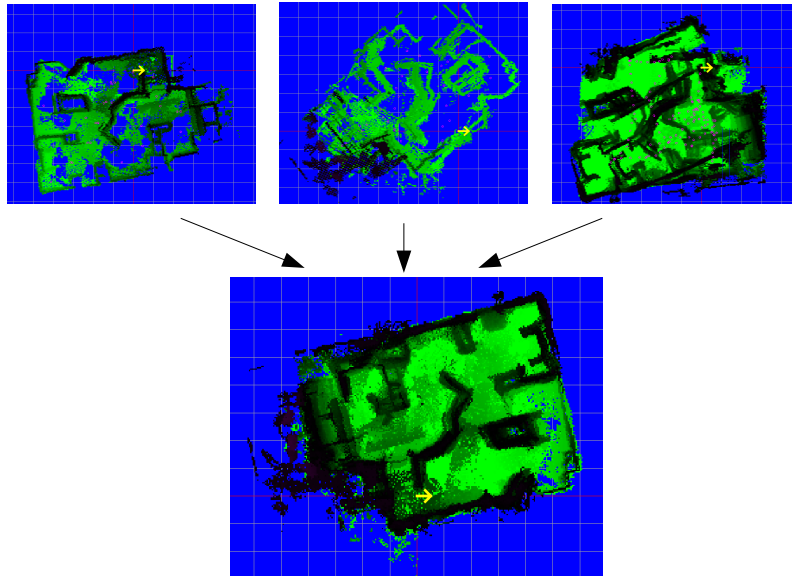


Figure 8: 3 台のロボットによる統合地図生成.

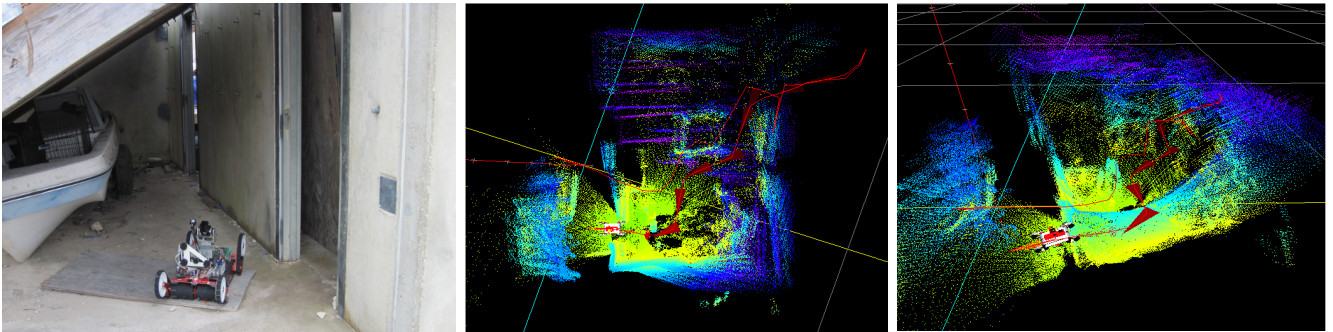


Figure 9: Disaster City における 3 次元地図生成.

- [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] 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)
- [5] Andrew Howard: Multi-robot Simultaneous Localization and Mapping using Particle Filters, *International Journal of Robotics Research*, vol.25, no.12, pp. 1243–1256, (2006)
- [6] 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)
- [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)