

# 倒壊環境を対象とした三次元環境地図を含む環境情報提示システムの開発

Development of environmental information presentation system

including three-dimensional environmental map intended for collapse environment

○ 蜂谷 孝治 (岡山大学) 正 永谷 圭司 (岡山大学) 正 田中 豊 (岡山大学)

Koji HACHIYA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Keiji NAGATANI, Okayama University Yutaka TANAKA, Okayama University

Rescue operation had a rough going very much because in Hanshin-Awaji (Kobe) Earthquake (1995), there was no effective rescue equipment. Ministry of Education set up a Big City Great Earthquake Mitigation Special Project(2002), and researches about rescue robots have been started there. Our research group has joined this project, and aim at developing the irregular ground moving robot which advances into inside the collapsed building, searches for deliverers and builds an internal environmental map after an earthquake and a disaster, etc. In the search for missing person in the building that collapses, a 3-dimensional map by acquired internal environmental information is effective according to the robot. Then, this research aim at the construction of a three-dimensional map according to environmental information that the robot acquired.

*Key Words:* VRML, Texture Mapping, Surface Model and GUI

## 1 はじめに

阪神大震災(1995),米同時多発テロ(2001)などにより,世界中で防災,レスキューに関する研究が盛んになってきた.これらに代表される,過去に起きた大規模災害においては,有効なレスキュー機器がなかったために,迅速な救助活動を行う事ができなかった.そのため,今後起こりうる災害に備え,有効なレスキュー機器の開発が必要となっている.

このような背景の下,2002年より,文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)」が発足し,この中で,レスキューロボットに関する研究が行われることとなった.本研究グループは,この大大特プロジェクトに参画し,災害により倒壊した建物の内部への進入,要救助者の搜索,及び,内部の環境地図を構築する移動ロボットの開発を目指している.

レスキュー活動では,倒壊した建物の屋内外は未知環境であり,不整地であると予測される.さらに,人が救助活動を行うには,二次災害が発生する危険性もある.そのため,レスキューロボットによって,建物内部の環境情報を獲得し,この危険性を大いに削減することが期待されている.そこで筆者らの研究グループでは,遠隔操作を用いたレスキューロボットの開発を目指し,不整地走行,自己位置認識,オペレータへの情報提示を目的として,探索ロボットの研究開発を行っている.

本研究では,この中でも特に,オペレータへの環境情報提示手法として,距離センサと視覚センサを用いた被災者探索活動に有用な三次元地図の構築を行うこととした.広範囲の三次元地図を構築するには,データを軽減することが重要となる.そこで本研究では,様々なデータ軽減手法を検討し,探索活動に有用な三次元地図の構築を行った.本稿では,検討した軽減手法とその適用例,テクスチャマッピング手法について述べる.

移動ロボットによる未知環境探索の研究は,これまでに数多く行われてきた.Thrunらは,移動ロボットを用いて炭鉱の探索を行い,広範囲での三次元地図を構築し,VRMLで表示することに成功した<sup>(2)</sup>.Hertzbergらは,二次元レーザ距離センサを用いて三次元環境データを獲得し,数箇所データのマッチングを行うことで,広範囲のオフィス内の環境を再現することに成功した<sup>(1)</sup>.これらの研究でも三次元モデルの構築を行っているが,本研究の特徴は,倒壊した建物内部等の狭空間や不整地を対象とする点である.

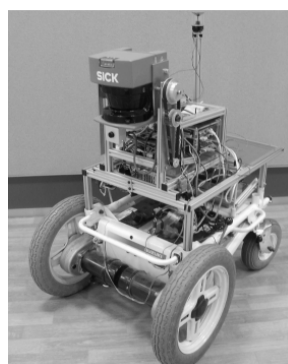


Fig. 1 BULL-DOG



Fig. 2 RD-2

## 2 研究プロジェクトの紹介

本研究グループでは,倒壊した建物の内部にできた空間を自律的に調査する移動ロボットの実現を目指し,1)不整地移動ロボットの開発,2)ロボットの自己位置推定手法,3)環境情報提示手法のサブテーマに担当を分け研究を進めている.以下に各サブテーマの概要を示す.

### 1. 不整地移動ロボットの開発

現在,本研究グループでは,クローラ型移動ロボット「RD-2」(図2)の製作,整備を進めている.この「RD-2」は,踏破能力を向上させるため,重心移動機構を有し,また,2自由度を有する小型アームに取り付けられた,軽量の三次元情報取得センサシステムを有する.

### 2. ロボットの自己位置推定手法

移動ロボットが未知環境を探索し,それを三次元環境情報として逐次構築するためには,観測地点におけるロボットの自己位置を正確に把握する必要がある.ロボットの姿勢については,傾斜センサにより獲得可能であるが,倒壊現場では,対象とする環境が不整地かつ閉空間であるため,オドメトリを用いた位置推定や,GPSの利用による位置推定は難しい.そこで,本研究グループでは「構築した三次元環境情報と,新たに獲得したセンサ情報比較し,現在位置を推定する」手法を用いることとした.この手法の概略を図3に示す.

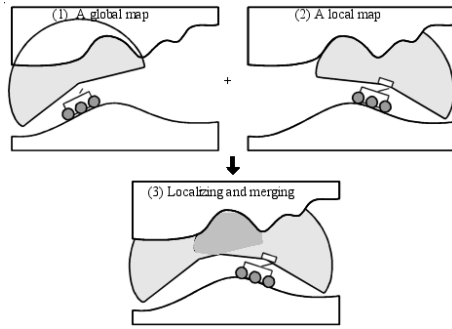


Fig. 3 Localization method

### 3. 環境情報提示手法

ロボットが搭載している距離センサと視覚センサによって獲得した環境情報を三次元的に提示するために、距離データと視覚データを統合した、三次元環境地図の構築に関する研究を進めている。

本研究では、この中でも特に、3)環境情報提示手法を担当し研究を行っている。なお、この研究で使用するロボットは、距離センサと視覚センサを搭載した移動ロボット「BULL-DOG」(図1)とした。このロボットは、ステアリング型台車をベースとしているため、このままでは不整地走行を行うことができないが、将来的には、このロボット上で開発した手法を、図2に示すような不整地走行踏破能力を有するロボットに実装する予定である。

### 3 三次元環境地図の構築

倒壊した建物の屋内外がどのような環境であるかを知るためには、建物内部の環境情報を三次元地図として表示することが有効であると考えられる。また、三次元地図を作成することで、環境情報を記録として保存することも可能となる。そこで本研究では、倒壊した建物内部の環境情報を用いて、三次元環境地図の構築を行うこととした。ここでは、昨年度までの三次元地図構築における成果と問題点<sup>(3)</sup>、ならびに本研究における三次元地図作成手法と適用例について示す。

#### 3.1 環境情報獲得手法

三次元距離データを獲得する手法として、本研究では、平面スキャンすることができる距離センサを、モータ制御によりチルト回転させることとした。移動ロボット「BULL-DOG」が有するセンサ(SICK社製LMS-200)は、前方180[deg]をスキャンすることが可能なため、これを $\theta = -30[\text{deg}]$ から150[deg]までチルト回転させる間に、1[deg]間隔でデータを獲得する(図4)。これにより、1スキャンで32,761ポイントの距離データを獲得することができる。三次元の距離データは、1つのポイントに対して $\theta, \phi$ , 距離 $r$ が得られる。三次元表示に用いるVRMLでは、このデータを極座標 $(\theta, \phi, r)$ から、直角座標 $(x, y, z)$ に変換して使用する。

#### 3.2 昨年度までのモデル構築手法と問題点

昨年度までに行われた研究では、レーザ距離センサにより獲得した距離データによる、サーフィスマデルの構築までが実現された。また、三つのカメラにより獲得した画像を、構築したサーフィスマデルに貼り付けることも行った<sup>(3)</sup>。しかし、画像を貼り付けた段階で、作成したVRMLファイルのサイズが膨大なものとなってしまい、本来仮想三次元空間内を任意の角度から見る事が出来るはずのVRMLファイルの処理が間に合わず、実用化が困難となっていた。その要因として、レーザ距離センサにより獲得した距離データの量が膨大であり、モデル

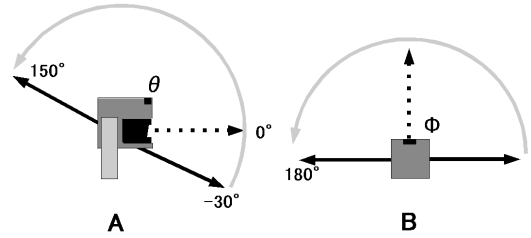


Fig. 4 A:Tilt Rotation B:Angle of Scan

構築において不必要なデータまで含まれていることが考えられる。そこで、本研究では、昨年度までの研究における、モデル構築手法に着目し、データの軽減化を考慮した三次元地図作成手法を検討することとした。

また、昨年度までの研究において行われた、テクスチャマッピング手法では、精度のよいテクスチャマッピングを行うことができなかった。そこで本研究では、実空間内の角度を比較的容易に獲得できるという点から、全方位カメラより得られる画像を用いたテクスチャマッピングを行うこととした。

#### 3.3 データ軽減を考慮したモデル構築手法

前節で示した問題を解決するために、本研究では、サーフィスマデル構築の段階から、データ軽減を考慮した三次元地図構築手法をいくつか提案する。これらを比較検討し、有用な手法を採用することとした。なお、本節において構築するモデルの対象環境は、岡山大学総合研究棟5F、リフレッシュスペース(図7)である。また、全てのデータを用いて構築したワイヤーフレームモデルを図8に示す。

##### 3.3.1 データの間引き

データ量の軽減を行うにあたり、まず単純にデータを間引きを行う手法を適用した。レーザ距離センサによって得られたデータを、 $\theta$ 方向、 $\phi$ 方向のデータの奇数番目だけを削減する事で、それぞれ1/2、つまり全体で1/4に軽減する事ができると考えられる。

この処理を行う事により、ファイルサイズを約1/4に削減する事ができた。しかし本手法では、データは荒くなり構築したモデルの精度は落ちてしまうため、これ以上の軽減は望めないと考えられる。この手法の適用例を図9Aに示す。

##### 3.3.2 データの量子化

本研究の環境情報獲得手法の特徴として、回転軸近くにはデータが集まり、回転軸から離れるほどデータは少ないという点が挙げられる。そこで空間内のデータの量を平均的にするために、仮想空間内を100[mm] × 100[mm] × 100[mm]のボックスで区切り、データの量子化処理を行った。

この手法により、データ数は約1/5に削減することができた。また、必要なデータを平均的に残すことが可能となったが、これまでの手法を用いたサーフィスマデルを構築するのが困難となった。この手法により構築したモデルを図9Bに示す。なお、モデル構築手法としてマーチン・キューブ法を用いた。

##### 3.3.3 三角関数によるデータの間引き

回転軸付近にデータが集まるという問題に対処するための手法として、三角関数の値の比によって、回転軸近くのデータを間引きする手法を提案する。

まず、(1)式によって、削減する比率(step)を算出する。これまでの手法では、チルト方向のデータは、1[deg]毎に表示していたが、本手法では、チルト回転( $\theta$ )方向のデータを、step

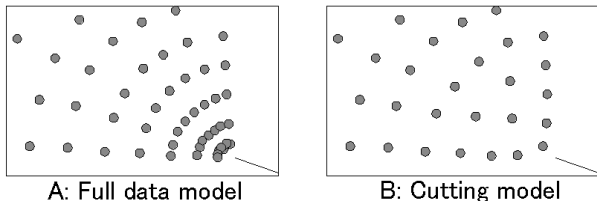


Fig. 5 Example of model using Trigonometrics

毎に表示する．この手法により，回転軸付近のデータを軽減することが可能となる（図5）．

$$step = \frac{1}{\cos(\phi - 90)} \quad (1)$$

この手法により，主に回転軸近くのデータを削減することで，ファイルサイズは約 3/4 となり，この軽減手法が有効であることが確認できた．また，冗長となるデータのみ削減したため，データの欠落はほとんど感じられない．本手法の適用例を，図9Cに示す．

### 3.3.4 法線ベクトルを用いた面の切り出し

上述した三つの軽減手法は，主に距離計測点のデータを減らす手法である．これに対し，以下にポイントデータを減らすのではなく，面の数を減らす手法を提案する．

本手法では，まず，構築したサーフィスモデルの各面における法線ベクトルを計算し，次に，ベクトルの方向により，同一平面とみなすことができた面をつなげ，面の切り出しを行う（図6）．これにより，モデル構築において用いる距離データの数を軽減でき，ファイルサイズを軽減化することが期待できる．また，本手法で構築したサーフィスモデルでは，面の数を減らすことができるため，テクスチャマッピングの簡易化が期待できる．

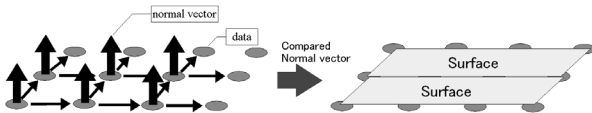


Fig. 6 Cutting method using normal vector

本手法によりファイルサイズは最大約 1/10 に軽減された．また，これにより，テクスチャマッピング（3.5節）が有効に行うことができると考えられる．本手法の適用例を，図9Dに示す．

### 3.4 各種のモデル構築手法に対する考察

Tab. 1 Comparison of data volume of each model

モデル構築手法	データ数	ファイルサイズ [Mbyte]
軽減前	32761	3.31
1/4 間引き	3663	0.808
量子化	5470	0.702( 1)
三角関数	25061	2.43
法線ベクトル	22761	0.302( 2)

( 1) モデル構築手法が異なる ( 2) サーフィスモデル

以上の提案した各手法を適用した結果，どの手法を用いてもデータが軽減され，効率のよいモデル構築を行うことができた．これにより，VRML の処理が軽減され，広範囲の三次元モデル

構築の可能性を見出すことができた．適用を行った各手法のデータ数，ファイルサイズを，表1に示す．

これらの手法を検討した結果，本研究では，冗長となるデータのみを削減できるという点から，まず三角関数による間引きを行うことで回転軸付近のデータを軽減し，その後，テクスチャマッピングが簡素化されるという点から，法線ベクトルを用いて面の切り出しを行うこととした．



Fig. 7 A target environment

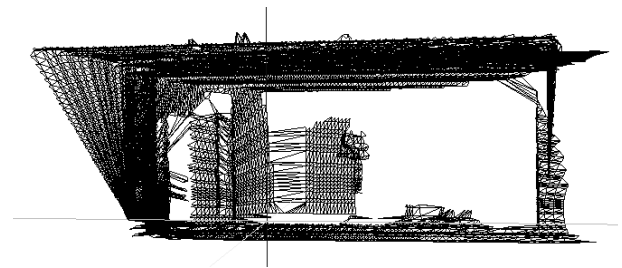


Fig. 8 Model using full data

### 3.5 全方位カメラを用いた自動テクスチャマッピング

作成したモデルに画像を貼り付ける作業を，テクスチャマッピングという．昨年度までの研究において，テクスチャマッピングは，1台の視野の狭い前方カメラを3台用いて行っていた．しかし，実空間における世界座標から画像内の座標を獲得するためのキャリブレーションが困難であり，良い成果を得られていなかった．そこで本研究では，1台でも広い視野を持ち，さらに，画像から環境内の角度を比較的容易に獲得可能な，全方位カメラを用いることとした．また，テクスチャを貼り付けるモデルは，最もテクスチャを効率よく貼り付けられるという点から，法線ベクトルによって面を切り出したモデルとした．以下にテクスチャマッピング手法について示す．

#### 3.5.1 テクスチャ座標

自動でテクスチャを貼り付けるには，ポリゴンへの貼り付け位置をコンピュータに認識させる必要がある．本研究で使用する VRML におけるテクスチャ座標は，テクスチャに対して横方向を s 座標，縦方向を t 座標とする座標系において，テクスチャの左下が (s,t) = (0.0,0.0)，テクスチャの右上が (s,t) = (1.0,1.0) となる．よって，画像内の座標を，画像のサイズに対する比に変換することで，テクスチャ座標を獲得すればよい．

#### 3.5.2 パノラマ変換

全方位カメラによって獲得した画像は，円弧状に歪んでいるため，このままでは直接扱うことができない．そこで，まず全方位カメラの画像をパノラマ変換することとした．(2)式により，全方位カメラの画像 (320 × 240[pixel]) の，対応する画素を算

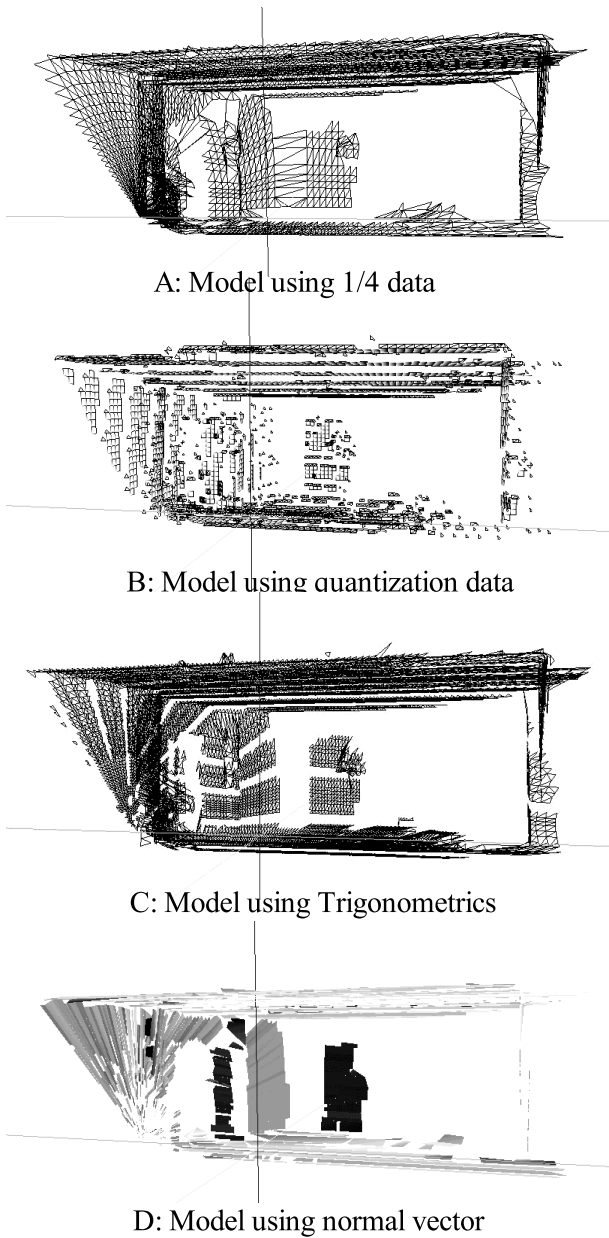


Fig. 9 Result of each technique

出し、パノラマ画像 (180 × 100[pixel]) を作成する。全方位カメラから得られた画像、作成したパノラマ画像を図 10 に示す。

$$\begin{aligned} u &= r \cos \theta + 160 \\ v &= r \sin \theta + 120 \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.5.3 テクスチャの貼り付け

法線ベクトルを用いて構築した三次元モデルに、パノラマ変換を行った画像を用いてテクスチャマッピングを以下の手順で行う。

まず、全方位カメラの  $\theta$  方向の画像獲得範囲を  $-30[deg]$  から  $20[deg]$  とし、実空間の世界座標と対応するパノラマ画像内の座標の対応点を求めるキャリブレーションを行う。次に、法線ベクトルによって構築した三次元モデルの各面の頂点に対応するテクスチャ座標を指定し、テクスチャマッピングの適用を行う。

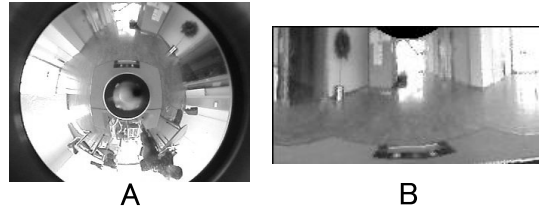


Fig. 10 A:Omnidirectional B:Panorama

### 3.6 テクスチャマッピングの適用例と考察

本研究におけるテクスチャマッピング手法の適用例を図 11 に示す。この図に示すように、場所によってテクスチャ座標に誤差が大きく出てしまった。これは、全方位カメラの画像の歪みが大きく、その補正が難しいためであり、また、適用したキャリブレーションが、 $\theta, \phi$  方向のみを考慮したものであったためであると考えられる。今後はこの歪みの修正する正確なキャリブレーションを行う手法を実装することが必要である。

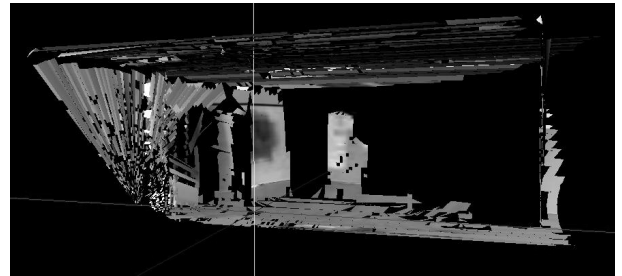


Fig. 11 Texture coordinate

### 4 おわりに

本研究では、三次元地図の構築を目指し、センサにより獲得した距離データと視覚データを元に、データ軽減を考慮したサーフィスモデルの構築と、全方位カメラを用いたテクスチャマッピングに関する研究を行った。これにより、本研究で提案した、データ軽減を考慮した三次元地図の構築手法、全方位カメラを用いたテクスチャマッピングが、三次元地図構築において有効であることを確認した。

今後の課題としては、精度の良いテクスチャマッピングを行うためのカメラキャリブレーション、移動後に獲得した複数観測地点のデータを用いた、広範囲の地図作成などが挙げられる。

謝辞

本研究は、文部科学省の大都市大震災軽減化プロジェクトの支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

### 【参考文献】

- (1) Andreas Nuchter, Hartmut Surmann, Joachim Hertzberg: "Automatic Model Refinement for 3D Reconstruction with Mobile Robots"
- (2) Sebastian Thrun, Dirk Hahnel, David Ferguson, Michael Montemerlo, Rudolph Triebel, Wolfram Burgard, Zachary Omohundro, Scott Thayer, William Whittaker: "A System for Volumetric Robotic Mapping of Abandoned Mines" ICRA 2003
- (3) 日笠 博史, 石田 宏, 永谷 圭司, 田中 豊: "瓦礫内環境提示を旨とした距離センサと視覚センサの統合による三次元地図の構築" ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004, 2P2-H-23 2004-6