

不整地移動ロボットのための環境地図の構築と自己位置推定

岡山大学 石田宏 永谷圭司 五福明夫

Localization and Mapping for Mobile Robot on Terrain Environment

Okayama Univ. Hiroshi Ishida, Keiji Nagatani, Akio Gofuku

Abstract : Our research group aims to develop a 3-dimensional mapping's algorithm that is installed on a mobile robot to search victims in a collapsed buildings for urban search and rescue(USAR). To realize this mission, it is important to map environment information, and also the mapping requires localization simultaneously. (This is called "SLAM problem".) In this research, we use 3-D map that is constructed by laser range finder, and estimate positional relationship between two points using correlation technique. In this paper, we introduce our localization and mapping method, and report a experimental results for localization.

Key Words: Urban search and rescue(USAR), 3-dimensional mapping, Localization, Digital elevation map

1. はじめに

1995年の阪神大震災、米オクラホマシティ連邦ビル爆破テロ以降、防災やレスキューに関するロボットの研究が多く行われるようになった。例えば、2001年にアメリカ合州国で起こった同時多発テロにおいて、被災現場の探索にロボットが利用された。このような背景の下、日本でも、2002年度より文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトを発足し、救助活動のためのロボットの研究開発を目指している。筆者らの研究グループも、この大都市大震災軽減化特別プロジェクトに参画し、レスキューロボットの研究開発を行っている。

倒壊現場でレスキュー活動を行っているレスキュー犬トレーナーの話によると、建物の倒壊現場における行方不明者の捜索や環境調査を行う場合、倒壊によって生じた高さ及び幅数十センチメートル程度の側溝を抜け、その先の空間を調査する必要があるそうである。このような環境は、余震で倒壊が進む危険もあり、レスキュー犬やレスキュー隊員にとって、危険で、大きなストレスとなる。したがって、このような閉空間を走行し、環境情報を獲得するレスキューロボットの実現が期待されている。

本研究では、このような地震等で倒壊した建物内の要救助者を捜索するロボットの実現を目指し、このロボットに必要とされる(1) 3次元空間におけるロボットの自己位置推定、及び(2) 3次元環境地図の構築に焦点を当て研究を行う。本研究で対象とする環境は3次元環境であり、「構築した3次元環境情報と新たに獲得したセンサ情報を比較し、相関演算を行い、現在位置を推定する」という手法を用いて、(1)、(2)を互いに補完することで災害現場の環境地図の構築とロボットの自己位置推定の実現を目指す。さらに、構築した環境地図をレスキュー活動にとって、より有用な情報にするために、環境情報をわかりやすい形でオペレータに提示することを目指す。

本稿では、3次元環境の表現として、S-DEM(Sphere digital elevation map)による環境表現と、S-DEMを

用いた自己位置推定手法を紹介し、いくつかの模擬環境における、この手法を評価する実験について報告する。

2. 関連研究

レスキューロボットに関する研究についての多くは、不整地を踏破する機構の開発に焦点が当てられている。広瀬らは、蛇型移動ロボット「群竜」において、複数のロボットが連結することによる瓦礫踏破に関する研究を行っている¹⁾。Murphyは、「a parent-and-child robot(親子ロボット)」を提案し²⁾、親ロボットによる不整地走行と、親ロボットに有線でつながれた子ロボット(親ロボットの中に収納可能である)による倒壊現場探索の研究を行っている。上述の例を含むレスキューロボットの多くは、移動機構にクローラ型を採用し、不整地の走行を可能にしている。筆者らが開発したロボットにおいても、移動機構としてクローラ型を採用した。

また、ロボットの自己位置推定と環境地図の構築に関する研究分野において、SLAM(simultaneous localization and mapping)と呼ばれる研究が2次元環境において実現されている。Thrunらは、SLAMアルゴリズムを複数台ロボットに適用している³⁾。また、Chosetらは、Generalized Voronoi Graphを用いたSLAMアルゴリズムを提案した⁴⁾。本研究で対象とする環境は3次元環境である。そこで、ロボットは異なる2地点で得られた環境情報をもとに相関演算を行い、ロボットの自己位置を推定することとした。

3次元空間における環境表現については、空間を立体的な格子に区切る手法はデータ量が非常に大きくなるため、いくつかのデータ量の削減手法が提案されている。このDEM(digital elevation map)は、メモリの量と計算コストを削減できる3次元環境表現としてよく知られている⁵⁾⁶⁾。DEMは平面上に区切られた各格子に高さ情報を登録する手法であるが、本研究で対象とする倒壊した建物内に存在する梁や天井などの情報について、DEMを用いて表現することは難しい。そこで、本研究で提案するS-DEM(Sphere-DEM)を環境表

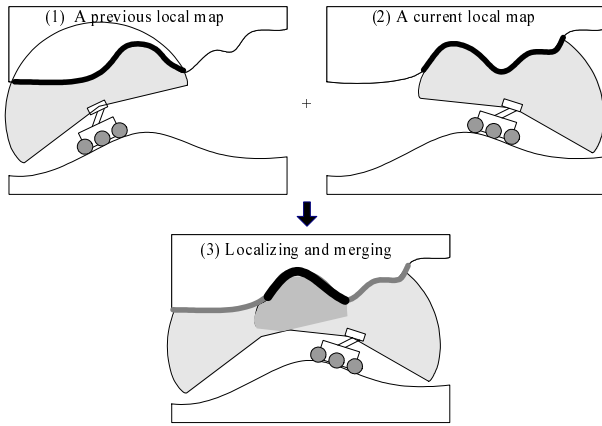


Fig.1 Introduction to our localization method

現の手法として用いる．また，グローバルマップについては，いくつかの S-DEM を統合することで表現することとした．

3. 研究の概要

移動ロボットが未知環境探索を行う場合，環境地図の作成と自己位置推定を行う必要がある．倒壊した建物の内部等の不整地環境においては，地面の凹凸などの情報がロボットの自己位置推定にとって有用である．そこで，以下の手順により環境地図の構築およびロボットの自己位置推定を行う．

1. ローカルマップ (previous local map) の作成 (ローカルマップとは，ロボットの現在位置から得られるセンサ情報によって構築される物体の位置を表す 3 次元距離情報の集合とする．)
2. ロボットを適当な距離だけ移動
3. 移動後のローカルマップ (current local map) を作成
4. 2 地点で構築したローカルマップの相関を取る
5. ロボットの移動量 (自己位置) を推定
6. 自己位置推定の結果を基に，current local map の情報を以前より構築してきたグローバルマップに付加し，current local map を次の自己位置推定における previous local map とする．
7. 2 に戻る

この手順を図示したものを Fig.1 に示す．本研究では，この手順に沿って，環境地図の構築を行うこととした．以下，4 章では，ローカルマップの構築手法，5 章では，ロボットの自己位置推定手法，6 章では，本研究で使用するロボット，そして，7 章では，本研究の提案する自己位置推定アルゴリズムの動作検証のための実験について述べる．

4. ローカルマップの構築

ローカルマップを構築するため，3 次元環境を Voxel (体積画素) を用いて表現すると，多くのメモリと計算コストが必要となる．このコストを削減するための不整地環境の表現手法として，digital elevation map (DEM) がよく知られている．DEM は，環境を 2

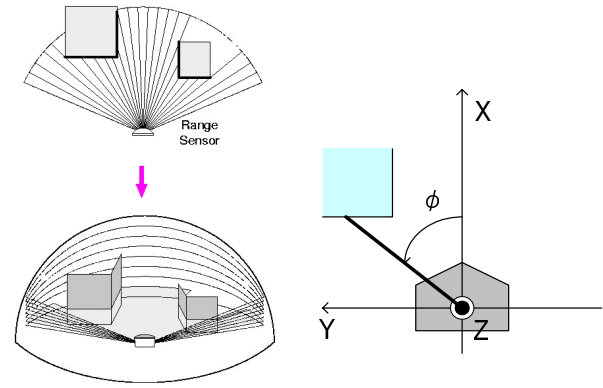


Fig.2 Acquisition of 3-dimensional environment

次元平面の格子に区切り，それぞれの格子に登録される高さ情報のうち最も高い情報をその格子における高さとし，3次元の環境を表現するものである．しかし，本研究で探索の対象とするのは，倒壊した建物内の空間である．このような環境は，主に閉空間であり，梁なども多く存在することが予想される．したがって，通常の DEM によって環境を表現することは困難である．

そこで，本研究では，ローカルマップの表現に sphere-DEM (S-DEM) を提案し，環境表現を行うこととした．この S-DEM は，DEM が平面を格子に区切るのに対して，球面を格子に区切り作成する elevation map である．Fig.3 に 2 次元の場合の S-DEM の概念図を示す．この図において，円は距離計の計測範囲を表し，灰色で示した線は，物体のない領域 (自由空間と定義する) を表している．

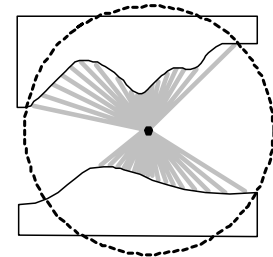


Fig.3 Construction of sphere digital elevation map (S-DEM)

本研究における S-DEM は，レーザ距離計を回転させることによって得られるセンシングデータ (Fig.2) を基に，センサの位置を球の中心として $r(\theta, \phi)$ で表現する． r は距離， θ は水平方向を $0[deg]$ とした y 軸周りのチルト回転角， ϕ は正面を $0[deg]$ とした距離センサの走査角を表す．この S-DEM は，センサ情報より直接構築できるという利点をもつ．しかし，センサ情報を直接用いることで， $\phi = \pm 90[deg]$ のとき，すべての θ に対して同一の点を表すため， $\phi = \pm 90[deg]$ の近傍で，データが集中するという問題も生ずる．

5. 自己位置推定手法

本研究では，移動前，移動後の 2 地点において取得したデータから構築した S-DEM に対して，S-DEM 中心の相対的な位置関係を求める手法を提案した⁷⁾．この手法は，2 地点における S-DEM のうち，一方の S-DEM 中心を移動して構築した S-DEM (仮想 S-DEM) と，もう一方の S-DEM との相関を (1) 式によって求める．この d を最小にする仮想 S-DEM を抽出すること

で、2つの S-DEM の相対位置関係が推定される。この手法を用いて、不整地環境における自己位置推定が可能であることを示した。

$$d = \sum_{\theta} \sum_{\phi} (r_v(\theta, \phi) - r_{cur}(\theta, \phi))^2 \quad (1)$$

しかし、この手法では、平らな壁がロボットの左右にある比較的狭い環境において、ロボットの進行方向の位置推定誤差が大きくなるという問題がみられた。これは、地面に存在する凹凸に関する距離情報に対し、壁などの均一な形状に関する距離情報の量が非常に多くなるため、正確な位置推定が困難となったと考えられる。言い換えれば、全てのセンサデータを同一に扱っていたという点が問題であった。

そこで、このように均一な形状のある環境に、S-DEM による自己位置推定を適用するため、壁、天井などの均一な形状をできる限り使用せず、地面の凹凸などの不整地環境に存在すると想定される特徴量のみを用いて自己位置推定を行うこととした。具体的には、得られた環境情報に対し、1) 特徴量の抽出、2) 仮想 S-DEM の構築、3) 相関演算を行うことで、2つの S-DEM 中心の相対的な位置関係を求め、自己位置を推定する。

5.1 特徴点の抽出

不整地環境において、3次元自己位置推定を行う場合、地面の凹凸は、有用な情報である。一方で、天井や壁が崩れていない場合、これらは、均一な形状であるため、距離情報を用いて、自己位置推定を行うことは困難である。そこで、本研究では、マッチングの精度を上げるため、天井や壁などの平面情報を除去することとした。環境に存在する平面は、距離センサの各チルト回転角 θ における走査に対して、直線状になる。このことを利用し、直線成分をハフ変換により除去することで、平面情報を除いた S-DEM を構築することとした。平面情報を除去することで、特徴点を用いた相関演算とデータ数の削減による相関計算の高速化が可能になる。

5.2 仮想 S-DEM の構築

移動前の S-DEM から、平面情報を除去したものを $r_{pre}(\theta, \phi)$ とする。 $r_{pre}(\theta, \phi)$ を直交座標 (x, y, z) に変換するためには (2) 式を用いる。

$$\begin{aligned} x &= r_{pre} \cos \theta \cos \phi \\ y &= r_{pre} \sin \theta \\ z &= -r_{pre} \sin \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

次に、この S-DEM の中心を (x_p, y_p, z_p) から (x_v, y_v, z_v) に移動させる。ここで、 (x_p, y_p, z_p) は、ロボットが現在の位置に至る前にいた地点である。この (x_v, y_v, z_v) を中心とし、直交座標系に変換した (x, y, z) を再計算することで、仮想 S-DEM $r_v(\theta, \phi)$ を (3) 式を用いて構築する。

$$\begin{aligned} r_v &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta &= \tan^{-1}(z/x) \\ \phi &= \tan^{-1}(y/\sqrt{x^2 + z^2}) \end{aligned} \quad (3)$$

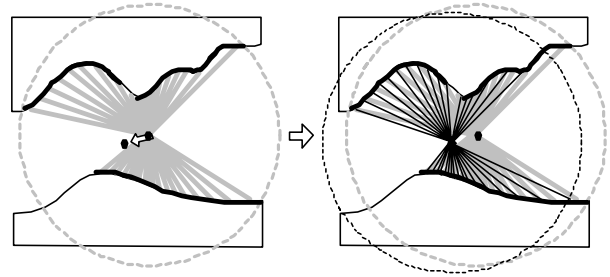


Fig.4 An example of virtual S-DEM

Fig.4 に 2次元の場合に構築される仮想 S-DEM の例を示す。Fig.4 左図では、S-DEM は灰色で表される。Fig.4 右図のように少し移動させることで、仮想 S-DEM が黒の細線で表されることがわかる。

5.3 相関演算と位置推定

仮想 S-DEM と移動後のローカルマップ $r_{cur}(\theta, \phi)$ との相関値は、各 (θ, ϕ) に対し、距離情報 r_v, r_{cur} を有する場合にのみ、それぞれの距離情報の差分の 2 乗と ϕ 毎の重み係数 $\cos \phi$ を用いて、(4) 式によって求める。

$$d = \sum_{\theta} \sum_{\phi} (r_v(\theta, \phi) - r_{cur}(\theta, \phi))^2 \cos \phi \quad (4)$$

この d を最小とする (x_v, y_v, z_v) は、ローカル S-DEM の中心に一致すると考えられる。したがって、 (x_p, y_p, z_p) から (x_v, y_v, z_v) の差分をロボットの移動量とし、自己位置推定を行う。

なお、本研究で提案する S-DEM の構築手法では、 $\phi = \pm 90[\text{deg}]$ の近傍で、データ数が多くなる。この環境に対するデータ数の不均等は相関演算に大きく影響する。そこで、 $\cos \phi$ を重み係数とすることで、 $\phi = \pm 90[\text{deg}]$ 近傍のデータの重みを小さくした。これにより、データ数の集中による影響を軽減させ、より正確な自己位置推定を可能とすると期待できる。

5.4 グローバルマップの構築

ロボットは、 (x_v, y_v, z_v) を求めることで、異なる 2 点における S-DEM を統合することができる。これを繰り返すことで、グローバルマップの作成を行う。

6. クローラ型移動ロボット Res-Dog

自己位置推定手法の有効性を確かめるため、本研究では、不整地移動可能な機構をもつ移動ロボット「Res-Dog」(Fig.5) を試作し、動作検証を行った。以下に、このロボットが有する機能を示す。

6.1 クローラ型移動機構

移動台車として、テクノクラフト社製クローラ型移動台車を用いることとした。この移動台車は、モータによって駆動し、バッテリー、制御用 PC、センサユニットを搭載し、有線で繋がれたコントローラによって走行することが可能である。

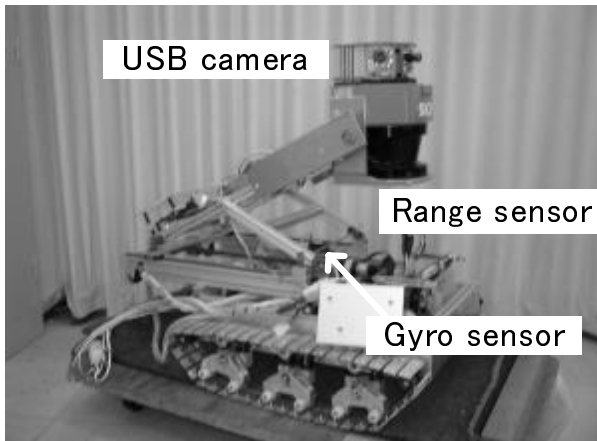


Fig.5 Our target robot(Res-Dog)

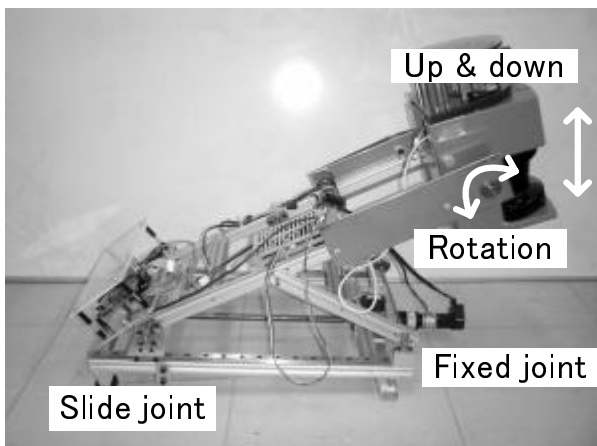


Fig.6 Developed sensor unit

6.2 センサユニット

対象とする環境の3次元環境情報を取得するため、本研究室でセンサユニットの設計製作を行った。このセンサユニットの外観を Fig.6 に、また、構成を以下に示す。

1. レーザ距離計 (SICK 社製)
このレーザ距離計はセンサ中心から前方 8m の半円状の領域にある物体を測定誤差 5mm 以内で計測できる。本研究では、遠くにある物体の角度誤差を考慮し、5m 以内のデータのみを用いることとする。
2. ジャイロセンサ (NEC Tokin 社製)
このジャイロセンサは、ジャイロだけでなく地磁気方位センサを備えており、ドリフトによる誤差をキャンセルする機能を有する。このジャイロセンサを用いて、ロボットの向きおよび姿勢の検出を行う。
3. 視覚センサ (I-O DATA 社製)
有効画素数 35 万画素、水平画角 60[deg] の USB カメラを 3 台、レーザ距離計の上部に設置した。距離計の回転時と同期して、画像情報を獲得することができる。

4. 上下リフト機構 (Fig.6)
ロボットが狭い側溝などを通過するためには、センサの位置を低くする必要がある。しかしながら、広い空間では、センサの位置が高い方がより広範囲の環境情報を取得できる。そこで、本研究では、パンタグラフ機構を用いて、レーザ距離計を上下リフトさせる機構を本センサユニットに持たせることとした。この機構は DC モータ、台形ねじ、スライド関節、固定間接によって構成される。
5. 回転機構
4. 節で述べたように、レーザ距離計を回転させる機構を有する。この回転は、H8S マイコンによって制御された DC モータによって行う。

7. 実験

7.1 実験環境

自己位置推定アルゴリズムの動作検証を行うため、研究室内に模擬倒壊環境を作り、実験を行った。この環境には、平らな床面にいくつかの物体が設置されている。実験は、環境 A:奥行き約 8[m], 幅 6[m], 高さ約 3[m](Fig.7), および、環境 B:奥行き約 6[m], 幅、高さそれぞれ約 2.5[m](Fig.13) の 2 種類の環境で行った。

7.2 実験の手順

(P-1) ロボットを水平な床の適当な位置に置き、この場所を初期位置とし、この位置において、 $-120 \leq \theta \leq 30[\text{deg}]$ でレーザ距離計をチルト回転させた。ここで、チルト回転 1[deg] 毎に、パン角 (前方 $-90 \leq \phi \leq 90[\text{deg}]$) 1[deg] 毎の距離情報を取得する。この実験では、モータのエンコーダ情報によってチルト回転角を検出した。このようにして、距離情報を $S\text{-DEM}_{pre}(\theta, \phi)$ に登録する。また、このときの S-DEM の中心を $(x_p, y_p, z_p) = (0, 0, 0)$ とする。

(P-2) ロボットを適当な距離だけ移動させ、設置した物体に乗り上げることでロボットの姿勢を変化させ、(P-1) と同様に距離情報を取得し、 $S\text{-DEM}_{cur}(\theta, \phi)$ として登録する。ただし、ロボットの姿勢は 3 軸のジャイロセンサにより検出を行うこととした。

(P-3) センサユニットの位置の候補として移動前の S-DEM の原点を移動させた仮想 $S\text{-DEM}_v(\theta, \phi)$ と $r_{cur}(\theta, \phi)$ との相関を (4) 式より求める。

(P-4) 求めた相関値のうち最小となる (x_v, y_v, z_v) を現在のロボットの位置とし、実測した移動量と比較する。

なお、これらの実験では、グローバル S-DEM の中心の移動量は、 $0 \leq x_v \leq 70[\text{cm}]$, $50 \leq y_v \leq 50[\text{cm}]$, $-30 \leq z_v \leq 30[\text{cm}]$ とし、 θ, ϕ によって決定される S-DEM の格子の大きさはそれぞれ 1[deg] とした。また、グローバル S-DEM の中心を 2[cm] 毎に移動させ、仮想 S-DEM を構築した。

7.3 実験結果と考察



Fig.7 A target environment A

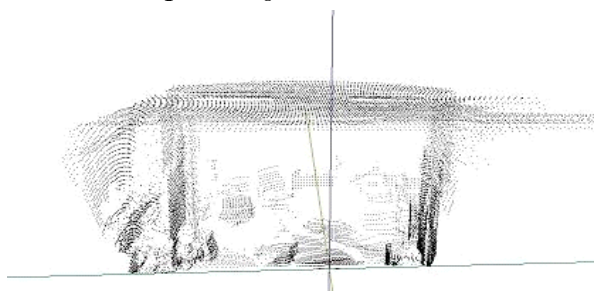


Fig.8 Range data of Environment A

環境 A の初期位置において、(P-1) に示した方法に従い、レーザ距離計を用いて得られた情報を 3次元のビューに表示したものを Fig.8 に示す。ここで、レーザ距離計に生ずるノイズを除去するために 3 回計測したメディアンを取ることとした。

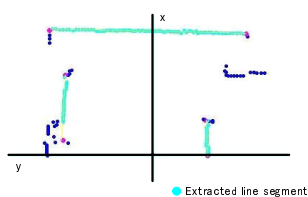


Fig.9 extracted segments

次に、このデータより、Fig.9 のように、各チルト回転角毎の距離情報に対して、ハフ変換による直線成分の抽出を行う。この直線成分を除去した後のデータを Fig.10 に示す。このデータにより、天井の平面情報が除去されていることがわかる。

この環境 A において、ロボットを $(x, y, z) = (35, 30, 5)[cm]$ 移動させ、姿勢は x, y, z 軸周りにそれぞれ $-2, -10, 15[deg]$ 傾いた状態で自己位置推定を行った。結果は、 $(x, y, z) = (32, 26, 6)[cm]$ となり、実測値とほぼ一致したといえる。 $(x, y, z) = (32, 26, 6)[cm]$ のときに構築した仮想 S-DEM を $\theta = -17[deg]$ の面で切ったものを Fig.11 に、移動後のローカルマップを $\theta = -17[deg]$ の面で切ったものを Fig.12 に示す。これより、仮想 S-DEM と移動後の S-DEM のマッチングが可能であることがわかる。

次に、環境 B についても同様の実験を行った。ここで、得られた環境情報を Fig.14 に示す。これにより、この環境下で、ロボットを $(x, y, z) = (35, 30, 5)[cm]$ 移動させ、姿勢は x, y, z 軸周りにそれぞれ $-2, -11, 22[deg]$ 傾いた状態で自己位置推定を行った。結果は、 $(x, y, z) = (44, -26, 20)[cm]$ となり、実測値と大きく異なった。

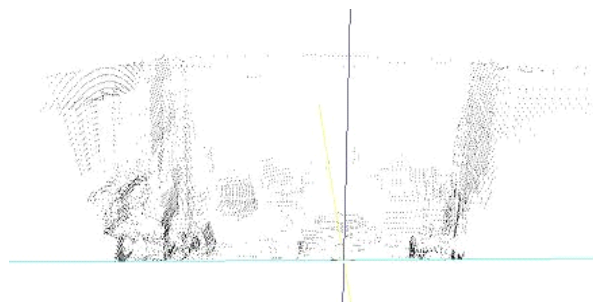


Fig.10 Range data of environment A (segments are eliminated)

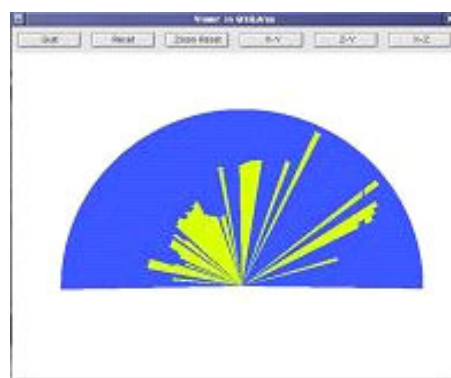


Fig.11 A virtual S-DEM sliced $\theta = -17[deg]$

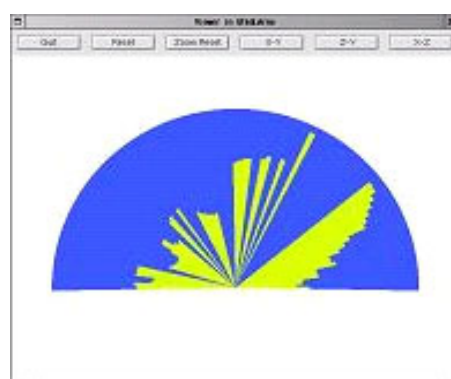


Fig.12 A current local map sliced $\theta = -17[deg]$

数回行った実験の中で、地面に設置した物体情報がハフ変換によって除去される状況がみられた。これは環境 B において、顕著に発生し、さらに、ジャイロセンサの誤差もあるため自己位置推定に大きく影響したと考えられる。しかし、特徴点がうまく抽出された場合には、自己位置推定は概ね成功するといえる。以上より、環境中の特徴をうまく抽出することが本研究の重要なカギであるといえる。

8. まとめと今後の課題

本稿では、地震等で倒壊した建物内を探索するロボットのための、S-DEM によるローカルマップの構築手法、ならびに、ロボットの自己位置推定手法について述べた。また、この自己位置推定アルゴリズムの動作



Fig.13 A target environment B

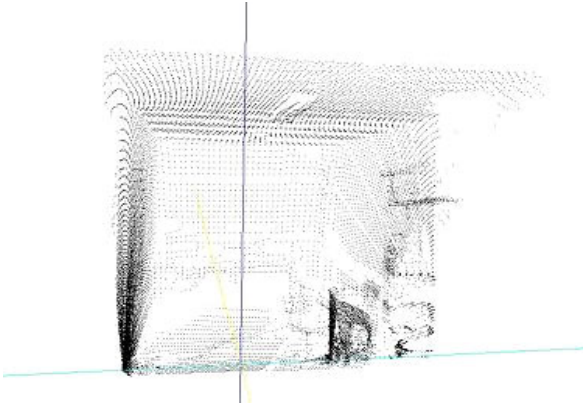


Fig.14 A result of laser range data(Environment B)

- 4) S.Thrun: A probabilistic online mapping algorithm for teams of mobile robots, International Journal of Robotics Research,20,5,335-363 (2001)
- 5) 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎: エレベーションマップに基づく不整地における移動探査ローバの経路計画, 日本ロボット学会誌, 18,7,1019-1025 (2000)
- 6) Fawzi Nashashibi, Philippe Fillatreau, Benoit Dacre-Wright, Thierry Simeon: 3-D Autonomous Navigation in a Natural Environment, IEEE International conference on Robotics and Automation, Vol.1, 433-439 (1994)
- 7) Keiji Nagatani, Hiroshi Ishida, Satoshi Yamanaka, Yutaka Tanaka: Three-dimensional Localization and Mapping for Mobile Robot in Disaster Environments, Conference on Intelligent Robots and System,3112-3117(2003)

検証のため、筆者らの所属する研究室内に模擬倒壊環境を作り実験を行った。実験により、環境情報の取得、環境中の特徴の抽出、仮想 S-DEM の構築を行い、異なる 2 地点における環境情報のマッチングを行うことで、ロボットの相対的な移動量を推定することが可能であることを確認した。

今後は、今回行った実験環境より広い環境、および狭路などの環境下でも本手法が適用できることを確認する予定である。さらに、現在、本研究で使用している「Res-Dog」は総重量約 36kg であるため、踏破性能に問題がある。そこで、軽量のセンサシステムの設計製作を目指す。

謝辞

本研究は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトにおける助成金により実施された。

参考文献

- 1) E.F.F.Shigeo Hirose, Takaya Shirasu: Proposal for cooperative robot “gunryu” composed of autonomous segments, Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, 17, p.107-118(1996)
- 2) R.Murphy, M. Ausmus, M. Bugjska, T. Ellis, T. Johnson, N. Kelly, J. Kiefer, and L. Pollock: Marsupial-like mobile robot society, IEEE Intelligent Systems, 15, 3, p.364-365 (1999).
- 3) H.Choset and K.Nagatani: Topological simultaneous localization and mapping(slam). toward exact localization without explicit localization, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17, 2, p.125-137 (2001)