

不整地移動ロボットのフロンティアベースド探索による 3次元環境地図生成

3D Environment Mapping by a Tracked Vehicle using Frontier-Based Search

○吉田 敏徳*, 藤田 豊己**

○Toshinori Yoshida*, Toyomi Fujita**

*東北工業大学大学院, **東北工業大学

*Graduate School, Tohoku Institute of Technology,
** Tohoku Institute of Technology

キーワード : レーザレンジファインダ(Laser Range Finder(LRF)), 不整地移動ロボット(Tracked Vehicle),
アーム型センサ位置姿勢制御機構(Arm-type sensor movable unit),
3次元環境地図(3D environment mapping)

連絡先 : 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号
東北工業大学工学部知能エレクトロニクス学科 藤田研究室
吉田 敏徳, [Tel:\(022\)247-8923](tel:0222478923), E-mail: t-fujita@tohtech.ac.jp

1. はじめに

近年、災害現場等での活用を目的とするレスキューロボットへの期待が高まっている。レスキューロボットには被災地内の状況の把握や要救助者の発見のために周囲の環境を効率的にくまなく探索し、形状地図を生成することが求められる。移動ロボットによる環境探索による地図生成の方法として、障害物回避による経路生成の手法[1]やフロンティアの概念に基づいた手法[2][3]が考案された。しかし、これらの手法では二次元のグリッドマップに基づいて地図の生成が行われており、山や谷などの立体的な地形を含む不整地環境での地図生成には不十分である。

そこで本研究では筆者らによって開発された可動型レーザレンジファインダ(以降 LRF と略す)を搭載した不整地移動ロボット[4][5]を用い、占有度ボクセルマップによる地図表現に基づいてフロンティアベースド探索を 3次元環境に適用することで地図生成を行うことを目的とする。

本稿では以下、第 2 章にて本ロボットにおける計測システムについて述べる。第 3 章では地図生成方法について述べ、第 4 章では本手法による環境地図生成の実験について述べる。

2. 計測システム

2-1. ロボットの構成

本研究で開発した不整地移動ロボットを図 1 に示す。座標系は図中に示すようにロボット前方方向を x 軸、左方向を y 軸、上方向を z 軸としている。このロボットは 2 個の駆動用クローラ、1 個のアーム型センサ位置・姿勢制御機構、1 個の LRF から成る。LRF を x 軸回転、y 軸回転する関節から成る 4 自由度アームの先端に搭載し、LRF の位置・姿勢を制御することで三次元形状計測を可能とする。LRF は北陽電機社製測域センサ UBG-04LX-F01 を使用している。また、アーム機構の各関節のアクチュエータには近藤科学社製 RC サーボモータ

KRS-4034HV を使用している。各クローラはチェーンとスプロケットから成り、チェーンのアタッチメントへゴムブロックを装着した構造となっている。対角のスプロケットを maxon 社製 DC モータ RE35 で駆動し、左右クローラの各速度を制御する。ロボット全体のサイズは L:350[mm], W:330[mm], H:320[mm] で総重量は約 11[kg] である。

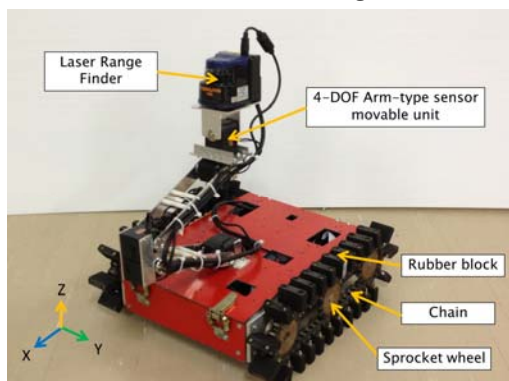


Fig.1 Developed tracked vehicle

2-2. センサ位置・姿勢制御機構

本研究で使用している 4 自由度アーム型センサ位置・姿勢制御機構を図 2 に示す。これはピッチ回転関節から成る従来型[5]にロール回転関節を追加した改良型である。2 リンクアームの先端に LRF を搭載した構造となっており、y 軸まわりの回転機構(第 1~3 関節)に加えて、先端に x 軸まわりの回転機構(第 4 関節)を有している。最下降時に LRF を水平に保つことができるようリンク間に 2 個のサーボモータを使用した。図中に各座標系を記しており、 Σ_1 座標系はアームベース部、 Σ_2 座標系は第 1 関節、 Σ_3 , Σ_4 座標系は第 2 関節、 Σ_5 座標系は第 3 関節、 Σ_6 座標系は第 4 関節にそれぞれ対応している。また、 Σ_7 座標系はセンサ座標系を表す。本機構により、対象形状やロボットの姿勢に応じて LRF の位置・姿勢を制御することで対象の三次元形状の計測が可能となる。

2-3. 3次元計測点の算出

LRF のスキャン角 θ_s における検出距離 d_s が得られたときのグローバル座標系 Σ_0 での三次元計測点の位置ベクトル \mathbf{X} は

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0\mathbf{P}_1 {}^1\mathbf{P}_6 {}^6\mathbf{P}_7 \begin{pmatrix} \mathbf{X}_s \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

で求められる。ここで \mathbf{X}_s はセンサ座標系における計測点のベクトルであり、

$$\mathbf{X}_s = d_s (\cos \theta_s, \sin \theta_s, 0)^T \dots(2)$$

となる。 \mathbf{T} は転置を表す。 ${}^i\mathbf{P}_{i+1}$ ($i=0, \dots, 6$) は Σ_i 座標系から Σ_{i+1} 座標系への同次変換行列であり、座標系間の回転行列を ${}^i\mathbf{R}_{i+1}$ 、並進ベクトルを ${}^i\mathbf{T}_{i+1}$ とすると

$${}^i\mathbf{P}_{i+1} = \begin{pmatrix} {}^i\mathbf{R}_{i+1} & {}^i\mathbf{T}_{i+1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (i=0, \dots, 6) \dots(3)$$

と表せる。 $i=0$ において、 ${}^0\mathbf{R}_1$ と ${}^0\mathbf{T}_1$ は計測時のロボットの位置と姿勢により決まる。 $i=1, \dots, 5$ において、 ${}^i\mathbf{R}_{i+1}$ は y_i 軸まわりに θ_{i+1} 回転する回転行列である。 $i=6$ において ${}^6\mathbf{R}_7$ は x 軸回りに θ_6 回転する回転行列となる。各並進ベクトルは

$${}^i\mathbf{T}_{i+1} = (0 \quad 0 \quad l_i)^T \quad (i=0, \dots, 6) \dots(4)$$

となる。 l_0 は Σ_0 座標系から Σ_1 座標系までの距離であり、 l_2, l_4 は各リンクの長さ、 l_3, l_5 はサーボモータ間の距離である。

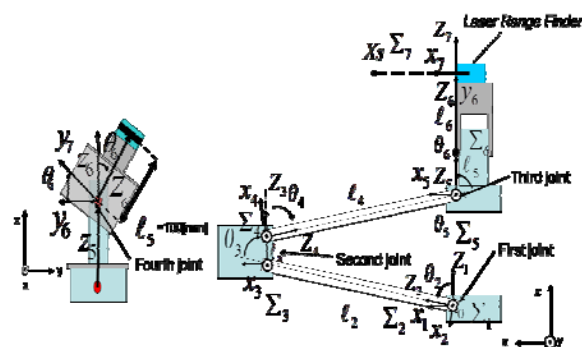


Fig.2 4-DOF arm-type sensor movable unit

2-4. 制御システム

制御システムを図 3 に示す。ロボットの制御ボードには Arduino Mega を用いており、センサ位置・姿勢制御機構のアームユニットおよびクローラ駆動の制御を行う。アーム制御については、ホスト PC から受信した LRF の目標位置・姿勢およびロボットの姿勢から各関節角の目標角を計算し、それに対応するモータ制御パルスを各サーボモータに送る。ロボットの姿勢角の検出にはカイオニクス社製ローノイズ 3 軸加速度センサ KXM52 を使用している。クローラの駆動については、ホスト PC から受信したロボットの目標位置から各速度を求め、駆動モータを PWM 制御する。LRF の計測と三次元計測点の算出、環境地図生成はホスト PC によ

り行われる。Host PC からシリアル通信にて LRF にスキャンコマンドを送信すると計測が実行され、距離データが返送される。このデータと制御ボードから受信したロボットの姿勢角、アームの関節角、ロボットの現在位置から計測点を算出する。この計算と計測点から得られた環境地図の描画には MATLAB を用いている。

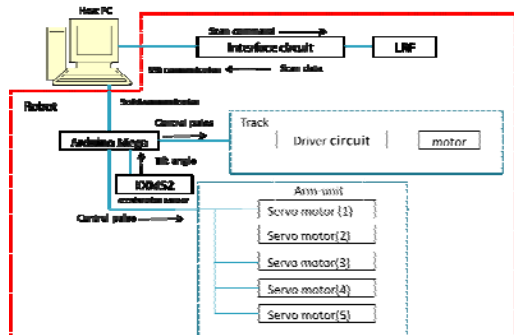


Fig. 3 Control system

2-5. 計測方法

本計測システムには主に 2 つの利点がある。

1 つ目の利点は LRF を水平に保ちながら上下方向に等間隔に移動してロボット前方の物体や山形状に対して等間隔なスキャンによる三次元形状計測が可能なことである。前方の階段状の山形状に対して計測を行った例を図 4 に示す。左図が計測環境、右図が得られた環境地図を示している。

2 つ目の利点はロボット前方および側方にある下方向の急斜面や谷形状に対しオクルージョンの少ない三次元形状計測が可能なことである。前方下り斜面の形状に対して計測を行った例を図 5 に示す。アームの第 1, 2 関節の姿勢を一定とし、第 3 関節を y 軸まわりに回転することでオクルージョンのない計測が可能となる。

また、側方下部の下り斜面に対して計測を行った例を図 6 に示す。この場合はアームの機構上、オクルージョンが生じる可能性があるが、センサを高い位置に移動させアームの第 4 関節を x 軸まわりに回転させることで計測領域を大きくすることができる。

3. 地図生成方法

3-1. 占有度ボクセルマップ

地図表現には占有度ボクセルマップ[6]を用いる。これは環境を等間隔なボックス(ボクセル)に分割し、各ボクセルにおける占有

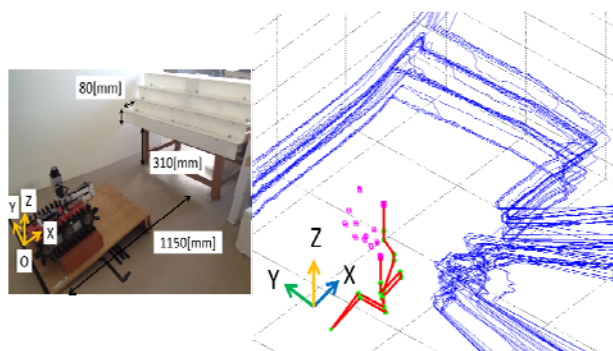


Fig. 4 Sensing of front mountain slope

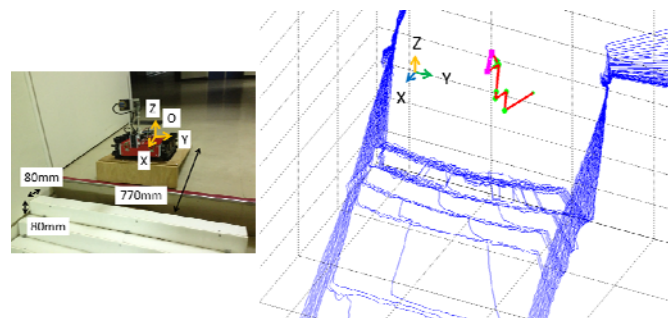


Fig. 5 Sensing of front downward slope

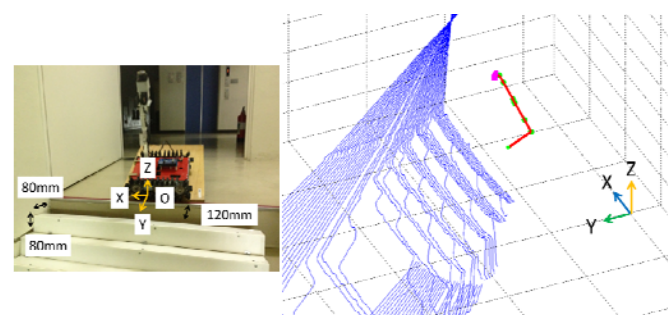


Fig. 6 Sensing of lateral downward slope

度により地図を表現する方法である。占有度ボクセルマップの概念を図 7 に表す。左図はロボット前方に壁を検出した様子であり、右図はそのときの点線内における占有度ボクセルマップである。本研究では、簡単のため、ボクセルの占有度を Occupied、Unknown、Free の 3 値で表すこととし、図 7 ではそれぞれ、黒色、灰色、青色で描いている。また、すべてのボクセルの占有情報を扱うとデータ量が膨大になるため、ランレングス符号化を応用し、同一占有度が連続する長さの情報を保持することでデータ量の圧縮を行っている。

3-2. フロンティアベースド探索

探索にはフロンティアベースドの手法[3]を用いる。本計測システムにおいては、フロンティアは「未知領域と隣接し、かつ

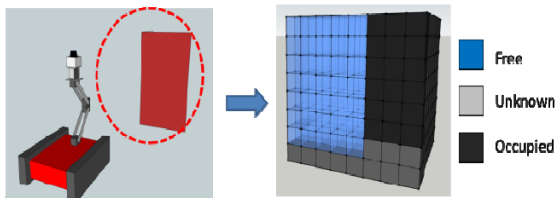


Fig. 7 Occupancy voxel map

ロボットの移動かアームユニットの動作により、「センサでの計測が可能なボクセル」と定義される。計測により得られた地図からフロンティアを検出し、新たな情報を得るために次の計測領域となるフロンティアを選択する。

3-3 計測フロンティアの選択

探索時には前方上下および左右方向に複数のフロンティアが生じる可能性があるため、状況に応じて次に計測するフロンティアを適切に選択する必要がある。そこで本研究では、ロボットの安全確保のために前方下部、正面方向、前方上部、左右方向の順で優先度を与え、それぞれの方向の計測可能なフロンティアのボクセル数と、ロボット移動およびアーム動作によるセンサの移動コストから計測フロンティアを決定することとした。図 8 にフロンティア選択アルゴリズムを示す。

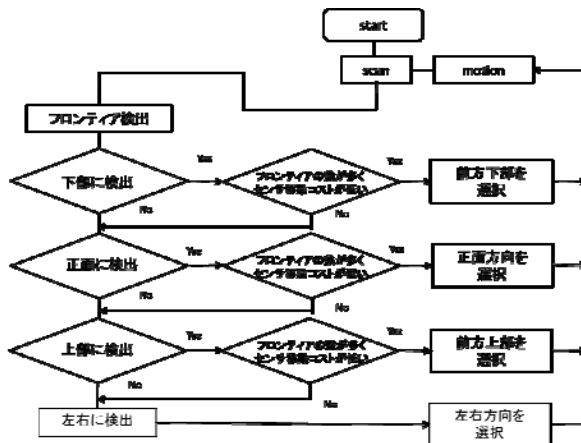


Fig. 8 Algorithm for frontier selection

この方法に基づいた具体例として、(1)前方に山形状がある場合、(2)前方に谷形状がある場合の 2 種類の状況におけるフロンティアの選択方法について述べる。

(1) 前方に山形状がある場合

前方に山形状がある場合の選択アルゴリズムに基づく地図生成例を図 9 に

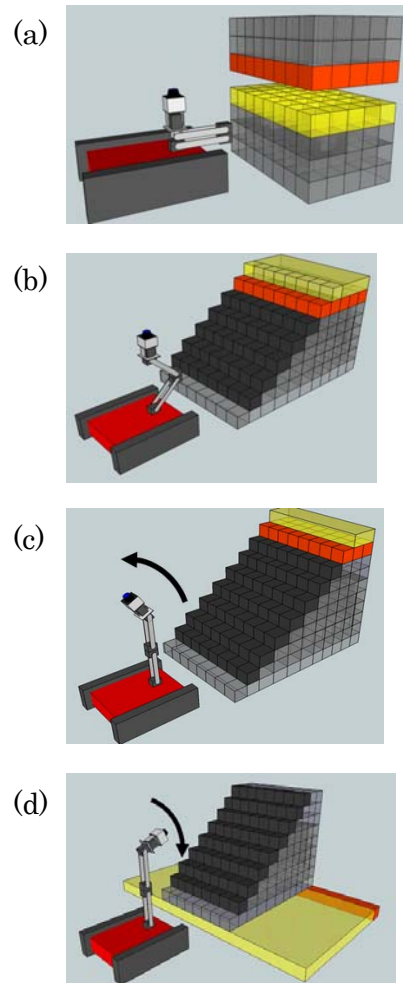


Fig. 9 Frontier selection in case that a mountain shape is detected ahead

示す。各ボクセルは灰色が Unknown、黄色が Frontier、オレンジ色が選択されたフロンティアを表している。また、このときロボットの周囲にフロンティアが生じているがここでは一部を抜粋している。

図 9 (a) は最初のスキャンにより得られるボクセルマップである。初期状態ではアームが折りたたまれ、センサが水平に置かれており、計測された水平面領域の上下にフロンティアが生じる。この場合、アームの構造上、一度のスキャンで計測できる下部フロンティアの数は少ない。そのため、センサの移動コストが低く、下部より多くのフロンティアが計測できる上部フロンティアが選択される。

その後、(a) と同一の理由から上部フロンティアの選択が繰り返され、山形状が検出される。このときの状態を図

9(b)に示す。

さらに上部フロンティアの計測が繰り返され、これ以上アームが伸ばせない位置までセンサが到達した場合、スキャン面を回転させてさらに上部のフロンティアが計測される。このときの状態を図 9(c)に示す。

そして、これ以上上部のフロンティアが計測できなくなったとき、下部のフロンティアが選択される。このときの状態を図 9(d)に示す。

(2) 前方に谷形状がある場合

前方に谷形状がある場合の選択アルゴリズムに基づく地図生成例を図 10 に示す。

図 10(a)は初期状態であり、山形状の場合と同様に計測領域の上下にフロンティアが生じるが、下部より多くのフロンティアが計測できる上部フロンティアが選択される。

その後、上部フロンティアの計測が繰り返され、これ以上アームが伸ばせない位置までセンサが到達したとき、図 10(b)に示すようにスキャン面を回転させてさらに上部のフロンティアが計測される。

そして、これ以上上部のフロンティアが計測できなくなったとき、下部のフロンティアが選択される。このときの状態を図 10(c)に示す。

この後、谷形状が計測される。このとき図 10(d)に示すようにセンサで谷を覗き込ませるようにして下部のフロンティアが奥から選択される。

4. 実験

4-1. 前方に山形状がある場合

図 11 に示すようにロボット前方に階段状の山形状を設置し、本方式による環境地図生成を行った。この結果を図 12 に示す。

図 12(a)は最初のスキャンにより生成された地図である。青点が Occupied のボックス、緑点が Free のボックス、空白領域は Unknown、黄色点が Frontier、赤点が選択されたフロンティア、赤い格子は LRF を表している。ボックスのサイズは $50 \times 50 \times 10$ [mm] とした。このとき、3-3 節で述べたように、センサの移動コストが低く、下部より多くのフロンティアが一度に計測でき

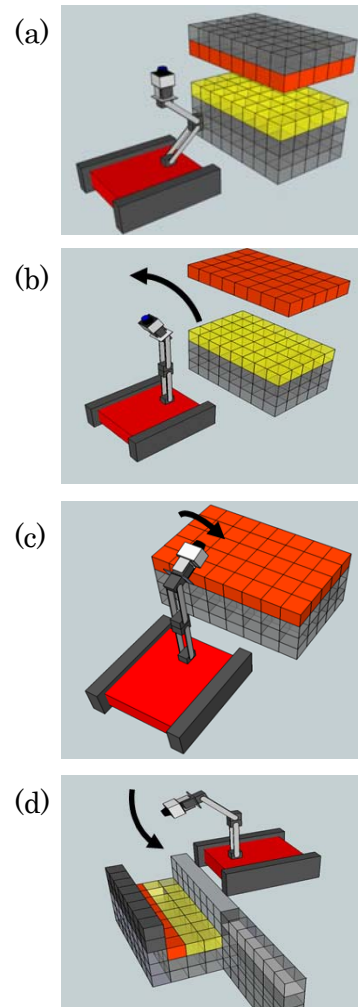


Fig.10 Frontier selection in case that a valley shape is detected ahead

る上部フロンティアが選択される。

その後、(a)と同一の理由から上部フロンティアの選択が繰り返され、山形状が検出された。50 回目のスキャン時の地図を図 12(b)に示す。

さらに上部フロンティアの計測が繰り返され、これ以上アームが伸ばせない位置まで到達した後、スキャン面を回転させてさらに上部のフロンティアが計測された。100 回目のスキャン時の地図を図 12(c)に示す。

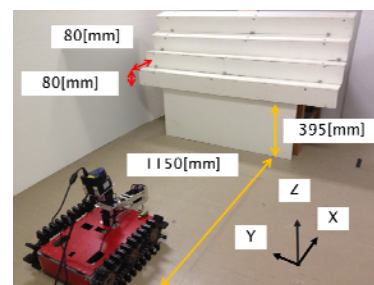


Fig. 11 Experimental setup in which a mountain shape is ahead

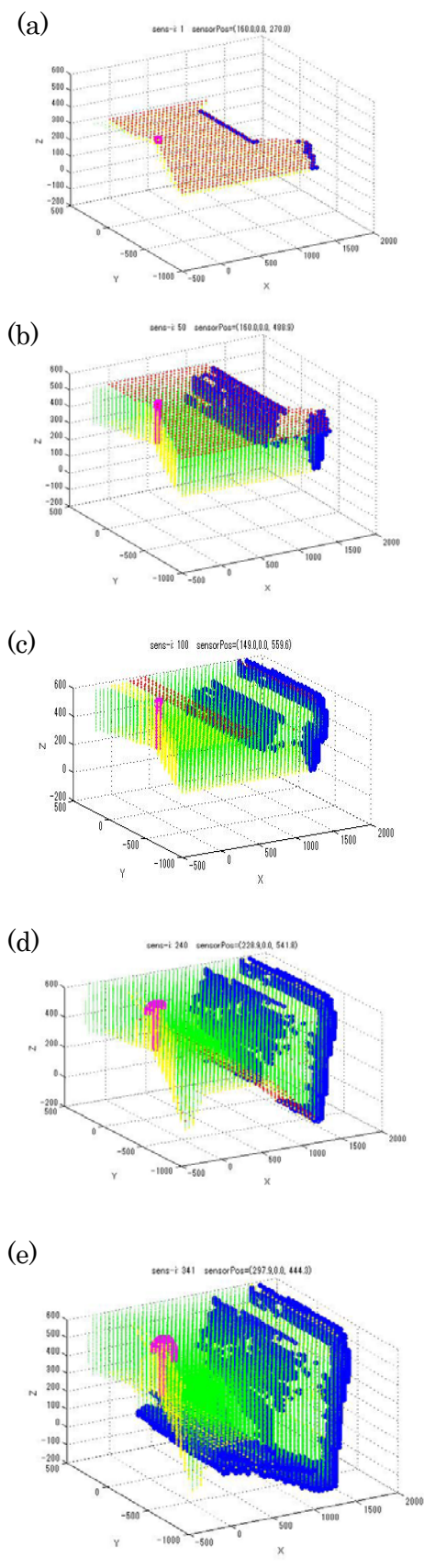


Fig.12 3D environment mapping in case that a mountain shape is ahead

そして、これ以上上部のフロンティアが計測できなくなったため、下部のフロンティアが選択され、240 回目のスキャン時の地図を図 12(d)に示す。

図 12(e)は得られた環境地図である。おおよそその階段形状を計測することができた。また、このときすべてのボクセルの占有度情報を保持した場合に対して、データ量を 5.3[%]まで圧縮することができた。

4-2 前方に谷形状がある場合

図 13 に示すようにロボット前方下部に谷形状を設置し、本方式による環境地図生成を行った。

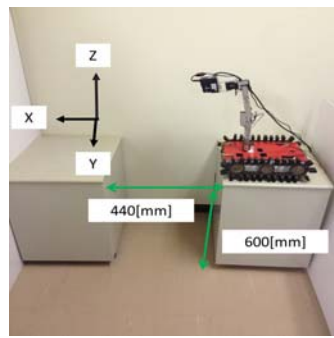


Fig. 13 Experimental setup in which a valley shape is ahead

この結果を図 14 に示す。ここではボクセルのサイズは $50 \times 50 \times 30$ [mm] とした。

図 14(a)は 40 回目のスキャンにより生成された地図である。山形状の場合と同様に上部のフロンティアが順に選択された。

そして、これ以上アームが伸ばせない位置まで到達したとき、スキャン面を回転させて、さらに上部のフロンティアが計測された。100 回目のスキャン時の地図を図 14(b)に示す。

その後、これ以上上部フロンティアが計測できなくなったため、下部のフロンティアが選択された。230 回目のスキャン時の地図を図 14(c)に示す。

図 14(d)は得られた環境地図である。おおよそその谷形状を計測することができた。また、このときすべてのボクセルの占有度情報を保持した場合に対して、データ量を 11.0[%]まで圧縮することができた。

図 14(e)は得られた地図の $y=-200$ [mm] から $y=50$ [mm] の間の断面図を表している。これより前方の谷形状が得られていることがわかる。

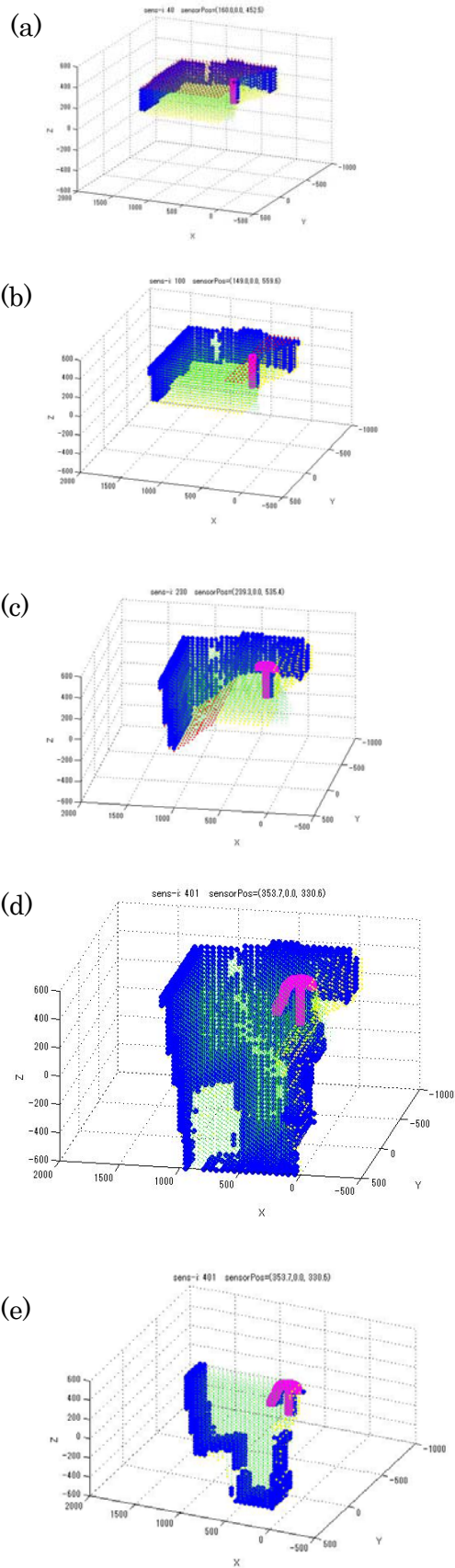


Fig.14 3D environment mapping in case that a valley shape is ahead

6. まとめ

本稿では、ロボットが不整地環境下において3次元形状地図を生成する方法について述べた。占有度ボクセルマップにより地図を表現し、探索時に検出したフロンティアに優先度を与えて計測領域を選択することにより、ロボットが安全かつ効率的に地図生成をすることが可能となる。今後は、ここで述べた2例の他の場合についても検討し、不整地環境下での実証実験を行っていく。

7. 参考文献

- [1] 古川 陽介, 池澤 良助, 尾崎 雄介, 安 弘, “車輪型移動ロボットによる環境地図情報取得のための自律走行法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-016 2011
- [2] 眞那田 勝也, 友納 正裕, 松元 明弘, “環境探索のための移動ロボットのナビゲーション”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-F13, 2009
- [3] Brian Yamauchi, “A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration” IEEE Int. Sym. On Computational Intelligence in Robotics and Automation, PP. 146-151, 1997
- [4] 吉田 敏徳, 藤田 豊己, “4自由度可動型レーザレンジファインダを搭載した不整地移動ロボットによる斜面形状の計測”, 第23回インテリジェント・システム・シンポジウム, ST-13-081, 2013
- [5] 近藤 雄哉, 藤田 豊己, “位置・姿勢制御可能な測域センサによる不整地移動ロボットの3次元環境計測”, FIT2009 第8回情報科学技術フォーラム, pp503-504 (2009)
- [6] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, Probabilistic Robotics, Mit Press, 2005