

レーザスキャナと移動ロボットを用いた 被災空間の密な3次元計測

大野和則^{†1,†2} 竹内栄二郎^{†2} 永谷圭司^{†2}
田所諭^{†2} 小柳栄次^{†3} 吉田智章^{†3}

著者らは、レーザ距離計と移動ロボットを用いた3次元計測に関する研究開発を行っている。本稿では、著者らがNEDOのプロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」で開発した、遠隔操縦のクローラロボットを用いた不整地の3次元地図構築と、最近の研究動向に関して説明する。サブクローラを有するクローラロボットを用いることで階段や瓦礫を踏破しつつ探査を行うことができる。ロボットの全周囲の均一で密な3次元形状を計測できるReticulate方式のレーザスキャナを開発し、クローラロボットに搭載した。開発したレーザスキャナは止まった状態でも周囲の詳細な3次元形状を計測することができる。また、ジャイロベースドオドメトリを用いて移動中のロボットの位置と姿勢を計測し、計測した3次元点群をつなぎ合わせることで、3次元地図を構築する。ジャイロベースドオドメトリを用いることで、クローラロボットの回転時の滑りによる誤差を考慮して、ロボットの位置と姿勢を推定できるようになった。計測した3次元点群を、重力の制約付きのICPマッチングや、GUIを用いて手動でつなぎ合わせることで詳細な3次元地図の構築を行っている。また、最近では、各ボクセルのレーザの通過率と点群の固有値を用いて3次元点群を壁、地面、瓦礫、細い構造材に分類する研究、レーザスキャナで計測した3次元地形を用いたクローラロボットの推定誤差の修正や、位置推定精度の向上に関する研究、複数台ロボットが計測した地図データを統合する研究を行っている。これらについても説明する。

3-D Shape Measurement of Disaster Environment Using Remote-controlled Tracked Vehicle with Laser Scanner

KAZUNORI OHNO^{†1,†2} EIJIRO TAKEUCHI^{†2}
KEIJI NAGATANI^{†2} SATOSHI TADOKORO^{†2}
EIJI KOYANAGI^{†3} and TOMOAKI YOSHIDA^{†3}

The authors have studied 3-D shape measurement by using 3-D laser scanners and tracked vehicles. The authors explain the overview of 3-D measurement

system by a remotely-operated tracked vehicle in a rubble environment. The tracked vehicle with sub-tracks can get over stairs and rubbles. The tracked vehicle was equipped with a 3-D laser scanner. The authors proposed a reticulate scan that enables to measure detailed 3-D point cloud data even if the tracked vehicle stopped. 3-D map was constructed by using these 3-D point cloud data and robot's position and posture. The position and posture were estimated using gyro-based odometry. The gyro-based odometry reduced estimation errors caused by slips of tracks during the rotation motion. 3-D map was also constructed by using ICP matching with the restriction of gravity, or manually. In addition, the author introduces our recent researches. The authors develop a method of classifying 3-D points cloud data into "wall", "ground", "rubble", and "pole" by using the pass rate of laser and eigen vector in each voxel. In addition, the authors develop the methods of robot's position estimation using 3-D measurement data, and the method of integrating 3-D measurement data that collected by several robots.

1. はじめに

屋内外の大規模な3次元地図の構築に関する研究は、国内外で盛んに行われている。デジタルカメラで撮影した大量の画像から、3次元の都市空間を復元する研究¹⁾、レーザ距離計を搭載した車を用いた都市空間の3次元計測²⁾、不整地を移動する車両と3次元スキャナを用いた坑内の3次元計測³⁾、気球や、設置型のレーザ距離計を用いた遺跡の計測⁴⁾などが知られている。著者らも、レーザ距離計と移動ロボットを用いた3次元計測に関する研究開発を行ってきた。本稿では、著者らの参加するNEDOのプロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」で開発した、遠隔操縦ロボットを用いた瓦礫の3次元計測に関して説明する。

図1の左側に、NEDOプロジェクトの概要を示す。火災やNuclear Biological Chemical(NBC)テロ等が地下で起こった場合、直接内部に入って状況を確認する必要がある。しかし、火災やNBCテロでは、人体に有毒な煙やガスが見えないため、調査に入る人間に取って非常に危険な状況となっている。本プロジェクトでは、人間の変わり、複数台の遠隔

†1 日本科学技術振興機構

JST

†2 東北大学

Tohoku University

†3 千葉工業大学 furo

furo CIT

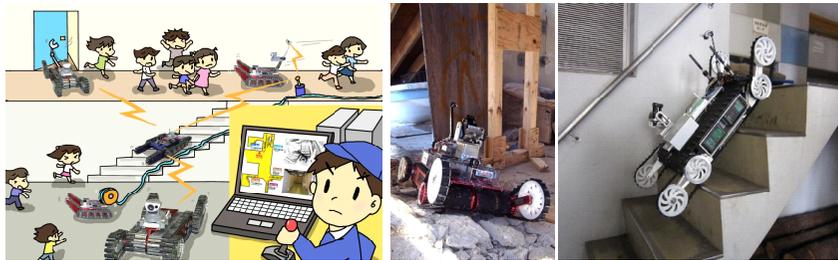


図 1 NEDO プロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」

Fig. 1 NEDO Project: Remotely-controlled Tracked Vehicles For Searching on Disaster Area and Victims

操縦クローラロボットを用いて探査することを目指している。

著者の研究グループで開発中の 3 次元計測の特徴は、不整地を踏破できるクローラロボットを用いて、被災地の 3 次元計測を実時間で行うことである。サブクローラを有するクローラロボットを用いることで、階段、段差、凹凸のある瓦礫上を走破することができる。レーザスキャナを用いることで、暗闇や、暗闇と明るい場所のコントラスト差が大きくカメラでは周囲を把握できない場合でも、正確に周囲の 3 次元計測を行うことができる。また、カメラ映像に加えて、3 次元操縦インタフェースを用いることで、遠隔の空間を把握しながら安全に探査を行うことができる。

本稿では、開発中の遠隔操縦探査ロボットの 3 次元計測の概要を説明する。詳細は、各章で紹介する参考文献と当日の発表で行う。以下、次の順で説明を行う。第 2 章で、遠隔操縦ロボットを用いた 3 次元計測に関して、第 3 章で全周囲の詳細な 3 次元計測が可能な小型レーザスキャナに関して説明する。第 4 章でジャイロオドメトリを、第 5 章で実際の環境で行った 3 次元地図構築に関して説明する。また、第 6 章では、現在取り組んでいる研究開発に関して概要を説明し、最後にまとめる。

2. 遠隔操縦型クローラロボットと小型レーザ距離計を用いた 3 次元計測

図 1 の右側に著者らの開発中のサブクローラを有するクローラロボット Kenaf と Quince の外観を示す^{5),6)}。開発したクローラロボットの特徴は、全身がクローラで覆われていること、サブクローラを有していることである。全身がクローラで覆われていることで、足場の悪い不整地でも走行することができる。また、サブクローラを用いて本体を持ち上げることで、メインクローラよりも高い 0.2m 以上の段差を乗り越えることができる。このロボット

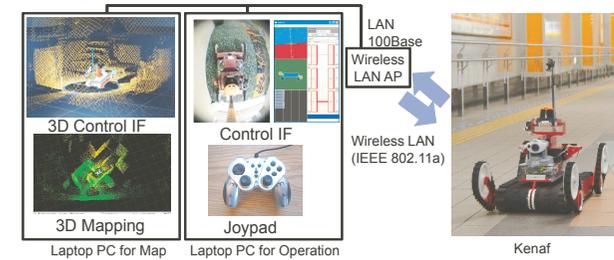


図 2 クローラロボットの遠隔操縦システムの構成

Fig. 2 Remote Control System of Tracked Vehicle

を遠隔操縦することで、瓦礫環境を探査して、3 次元地図を構築する。

探査ロボットは、2 次災害のない安全な場所から、無線 LAN 通信を経由して操縦される。操縦者は、ロボットに搭載したカメラ映像と、レーザスキャナで計測した 3 次元点群を用いて操縦を行う (図 2)。3 次元点群上に、ロボットの位置と姿勢にあわせて 3 次元モデルを描画することで、3 次元操縦インタフェースを構築した⁷⁾。操縦者は、カメラと 3 次元操縦 IF を見ることでロボットの周囲の状況を、地図を見ることでロボットのおおよその位置を把握しながら探査を行う。

ロボットは、移動しながら所々で計測した 3 次元点群をつなぎ合わせることで、3 次元の地図を構築する。クローラロボットを用いて 3 次元地図を構築する場合、1. 全周囲の隠れの少ない密な 3 次元点群の計測を行うレーザスキャナ、2. 走行中のロボットの位置・姿勢の計測するクローラロボットのオドメトリの開発、3. オドメトリで推定した位置と姿勢の誤差の修正が重要になる。著者らの研究グループではこれらの課題を以下のように解決した。

1. のレーザスキャナの候補は、商用の物を含め複数存在した。しかし、20kg 程度のロボットに搭載可能な大きさ (高さが 0.2m 程度) で、かつ、ロボットの運動性能を妨げない 2kg 程度の重さの商品が存在しなかった。また、従来の計測方法で広範囲を高い点群の密度で計測を行うには、時間がかかるという課題が生じた。著者らは、新たに Reticulate 方式の計測方法を開発した。また、専用の小型パンチルト台を開発することで、重さの問題も解決した (第 3 章)。

2. の位置推定は、クローラロボットの滑りの影響を考慮した、3 次元ジャイロベースドオドメトリを開発した。従来のジャイロオドメトリとは異なり、回転に伴うスリップを考慮して並進速度 v の導出を行うことで、クローラの位置と姿勢を正確に計測できるように

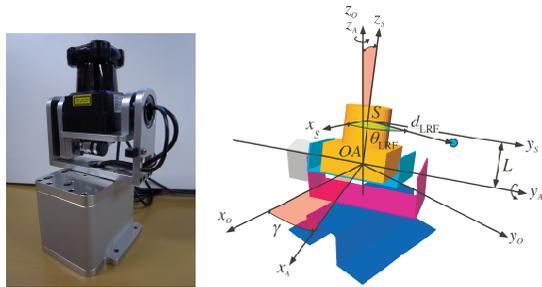


図3 Reticulate方式の3次元レーザスキャナの外觀とモデル

Fig.3 3-D Laser Scanner of Reticulate Scan Method and the Geometrical Model

なった(第4章)。

3.の修正の問題は、重力制約付きの3次元点群のスキャンマッチングと、マニュアルによる修正を組み合わせることで実現した。地図構築に関しては第5章で説明する。

このように、それぞれの課題を解決することで、クローラロボットを遠隔操縦することで、3次元地図を構築する方法を開発した。

3. 広範囲を密に計測できる小型レーザスキャナ

2次元の形状が計測可能なレーザ距離計を、アクチュエータで振ることで、広範囲の3次元形状を計測できることが知られている。しかし、振り方を工夫しないと特定の場所だけに点が密集してしまい、それ以外の場所の点の密度が低くなる。点の密度の低い場所では細かい形状が計測できないといった問題が生じた。また、人間が見て認識しやすい形状を計測することができるようにレーザの軌跡を工夫する必要があった。著者らは、新しく Reticulate方式の計測方法を開発した。

3.1 開発した3次元レーザスキャナの特徴

著者らが開発した Reticulate方式の3次元レーザスキャナ(HDScanner)の外形を図3の左側に、性能を表1に示す。HDScannerは、専用のパンチルト台を開発することで、(1)小型軽量、(2)水平360°、垂直130°の広範囲の3次元形状を計測、(3)計測点群の密度の偏りを軽減、(4)移動物体によって生じる計測誤差の軽減といった特徴を有している。以下、本章では、Reticulate方式の(1)(2)の詳細を説明する。Reticulate方式の(3)(4)の特徴の詳細説明と、HDScannerのハードウェア構成は、文献^{11), 14)}に譲る。

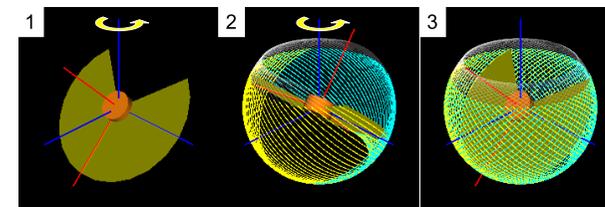


図4 Reticulate方式の3次元計測のレーザ軌跡

Fig.4 Laser Point Trajectory of Reticulate Scan

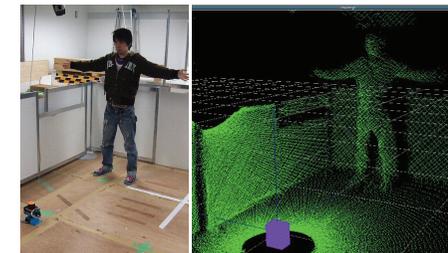


図5 Reticulate方式で計測した3次元点群

Fig.5 3-D Point Cloud Data of Reticulate Scan

表1 HDScannerの仕様

Table 1 Specification of HDScanner

Distance[m]	max 15
View angle [deg]	360(H), max 130(V)
Weight[kg] & size [m]	2.1, (0.1(W),0.13(D), 0.22(H))
Time of 3D scan [s]	Between 1 and 6

3.2 Reticulate方式の3次元レーザスキャナの計測原理

Reticulate方式は、2次元のレーザ距離計をピッチ角方向に β 傾け、ヨー角方向に一定の角速度 $\dot{\gamma}$ で回転させることで全周囲の形状を計測する。

2次元のレーザ距離計とパンチルト台の角度から3次元形状を復元する変換について、モデルと式を用いて説明する。センサ座標系と各種記号を図3の右側のように定義する。パンチルト台のセンサを載せる部分の回転中心は図3のOになり、これを3次元スキャナのベース座標系と定義した。また、2次元レーザ距離計の走査面の中心を原点とするセンサ座

標を S と定義する．

γ は、 O の z 軸周りの回転と定義する． O を γ だけ回転させた座標系 A を定める． β は A の y 軸周りの回転角と定義する．座標 A と 2 次元レーザー距離計の座標 S の間には、 z 軸方向に L のオフセットが存在する． S 座標系の z 軸周りに計測点を回転させることで、 270° の範囲を 0.36° の角度分解能で 2 次元形状を計測する．レーザー光の向きと距離を θ_{LRF} と d_{LRF} と定義する．座標系 O からみた計測点 p の座標は式 (1) で表すことができる．

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{LRF} & -\sin \theta_{LRF} & 0 \\ \sin \theta_{LRF} & \cos \theta_{LRF} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{LRF} \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \quad (1)$$

図 4 に変換式を用いて計算したレーザー光の軌跡を示す．レーザー光の軌跡は、空間をなるべく均一の分解能で、かつ異なる向きの切断面で計測していることが確認できた．Reticulate 方式の 3 次元レーザースキャナで人間を計測した結果を図 5 に示す．人間の形状が人間の目でみてわかる程度の詳細な形状を計測できていることが確認できた．

単位球表面の単位角度当たりの点の数で計測密度を評価する (図 6)．Pitching 方式の計測方法の点群密度と比較する．Pitching 方式とは、水平の 2 次元レーザースキャナをピッチ軸周りに上下に振ることで 3 次元計測を行う方法である．単純な機構で 3 次元計測が行えるため、多くの移動ロボットの研究で用いられている³⁾．

Pitching 方式と Reticulate 方式の計測密度を、図 7 と図 8 にそれぞれ示す．Pitching 方式では、ピッチ軸周りに点が集積しているため、その部分の密度が高くなっていることがわかる．点が特定の部分に集積した結果、それ以外の部分の点の密度が低下している．一方、Reticulate 方式では、目立った点の集積がなく、全体的に高い密度で計測できている．このことから、移動ロボットの 3 次元計測には適した計測方法である．

4. 3 次元ジャイロベースドオドメトリ

平地を走行する移動ロボットの位置推定は、微小移動量の積算からロボットの自己位置を求める「オドメトリ」を用いることが多い．オドメトリは、走行に伴って累積誤差が増大するが、短い距離であれば高い精度で位置推定が可能である．しかし、対象とするクローラ

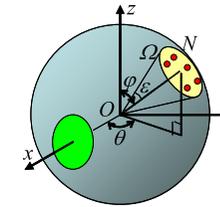


図 6 単位球を用いた点群密度の計測
Fig.6 Measurement of Point Density

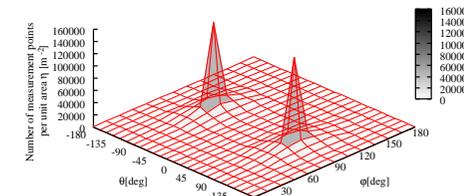


図 7 Pitching 方式の 3 次元計測の点群密度 ($m=72$).
Fig.7 Point Density of Pitching Scan Method ($m=72$).

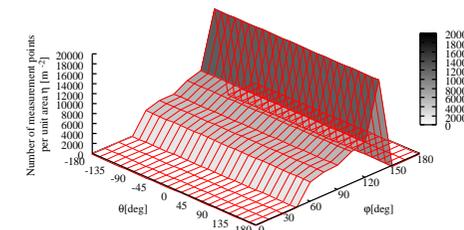


図 8 Reticulate 方式の 3 次元計測の点群密度 ($m=72$).
Fig.8 Point Density of Reticulate Scan Method ($m=72$).

ボットの場合、回転時に生ずるクローラのスリップが問題となり、短距離走行においても、大きな誤差が生ずる可能性がある．また、対象とする環境が 3 次元である場合、位置推定も 3 次元的に行う必要がある．著者らの研究グループでは、前者の問題を、スリップ補償オドメトリにより、後者の問題を、3 軸ジャイロスコープを利用した 3 次元オドメトリで解決した．

4.1 スリップ補償オドメトリ

まず、平面内でのクローラのスリップを推定する。クローラロボットが巡回走行する際、そのクローラの下面には、必ずスリップが生ずる。左右のスリップの度合い(スリップ率)を、それぞれ a_l 、 a_r とおくと、クローラロボットの並進速度 (\dot{x}, \dot{y}) 、ならびに巡回速度 $\dot{\theta}$ は、式 (2)、(3)、(4) と表すことができる⁸⁾。

$$\dot{x} = \frac{v_r(1-a_r) + v_l(1-a_l)}{2} \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{y} = \frac{v_r(1-a_r) + v_l(1-a_l)}{2} \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_r(1-a_r) - v_l(1-a_l)}{2d} \quad (4)$$

ただし、 v_l 、 v_r は、左右クローラの周速度、 $2d$ は、トレッドを示す。この $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ を積算することで、クローラロボットの位置推定が可能となる。

この式の中で、計測困難であるパラメータは、左右のスリップ率 a_l 、 a_r であるが、これを直接計測することは、非常に難しい。そこで、筆者らは、ジャイロスコープを利用して $\dot{\theta}$ を直接測定し、左右のスリップ率を推定することとした。しかしながら、式 (4) のみでは、2つの未知パラメータを特定することができない。そこで、筆者らは、実験式 (5) を導入する。

$$\frac{a_l}{a_r} = -\text{sgn}(v_l \cdot v_r) \sqrt{\left| \frac{v_r}{v_l} \right|}. \quad (5)$$

式 (5) と式 (4) を連立することで、左右のスリップ率 a_l 、 a_r を推定することとした。この実験式 (5) は、クローラロボットを利用した数多くの実験から導出されたもので、P タイル、カーペット、人工芝の上において、ほぼ成立した。 a_l 、 a_r を推定できれば、式 (2)、式 (3) から、クローラロボットのオドメトリが実現される。詳細は、文献⁹⁾ に譲る。

4.2 3次元ジャイロベースオドメトリ

著者らは、ジャイロスコープを3台利用し、スリップ補償オドメトリを3次元オドメトリに拡張した。 x 軸をロボットの進行方向、 z 軸を地面に垂直と定義すると、ある瞬間のロボットの姿勢のクォータニオンが 0q_n で表されるとき、微小姿勢変動量 ${}^nq_{n+1}$ は、式 (6) と表すことができる。 0q_n は、最初0の時を基準とした時刻 n の時の姿勢を、 ${}^nq_{n+1}$ は、時刻 n を基準とした時刻 $n+1$ の時の姿勢を表す。

$${}^nq_{n+1} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \sin \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ は、ジャイロスコープで獲得した x 軸、 y 軸、 z 軸回りの微小回転角度を示す。これにより、ロボットの姿勢 ${}^0q_{n+1}$ は、式 (7) で更新される。

$${}^0q_{n+1} = {}^0q_n \times {}^nq_{n+1}. \quad (7)$$

一方、前節の結果得られた地面に対する微小並進移動量 ΔX_n から、3次元な微小変位は、式 (7) を利用して、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ {}^np_{n+1} \end{bmatrix} = {}^0q_{n+1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta X_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times {}^{n+1}q_0 \quad (8)$$

と表すことができる。これにより、ロボットの位置は、

$${}^0p_{n+1} = {}^0p_n + {}^np_{n+1}. \quad (9)$$

と更新される。以上、式 (7) と (9) を利用することで、ロボットの3次元的な位置・姿勢を更新することが可能となる。詳細は、文献¹⁰⁾ に譲る。

4.3 3次元ジャイロベースオドメトリの基礎試験

3次元ベースオドメトリをロボットに実装し、階段昇降の試験を行った。ロボットは、東北大学機械系1号館4階から3階までの間をマニュアル走行で往復し、その間の位置情報を計測した。総走行距離は約、23メートルであった。数回の計測より、どの結果についても、図9に示すように、3次元の自己位置が、ほぼ推定できていることが分かる。ただし、 z 軸方向の誤差が常に下向きの方に生ずるといった結果も見取れた。これは、階段を走行する際に、重力により、下向きにスリップすることが原因である。

5. 遠隔操縦による3次元地図構築

著者らはこれまで、仙台市の地下鉄構内や、米国の Federal Emergency Management Agency(FEMA) 隊員の訓練施設(Disaster City)で3次元計測実験を行った。図10が、仙台市の地下鉄で計測した結果になる。図11が、Disaster Cityで計測した結果になる。

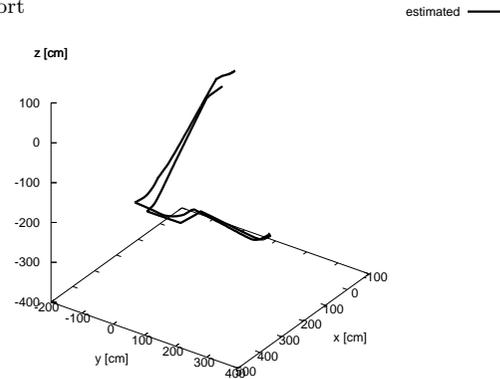


図 9 3次元ジャイロベースドオドメトリの階段での位置推定結果
Fig.9 Result of 3-dimensional Gyro-based Odometry on Stair

仙台市の地下鉄は、改札階、階段の踊り場、ホーム階の地下3層構造から成り立っている。地下鉄の営業が終わった真夜中に計測実験を行った。仙台市の地下鉄では、ロボットの3自由度の位置と姿勢 $p = (x, y, \theta_{yaw})$ を、ジャイロベースドオドメトリで計測した。走行中所々で停止して3次元点群を計測した。計測した3次元点群を重力の制約付きのICPマッチングでつなぎ合わせ、地図を構築した。マッチングによる点群のつなぎ合わせはオフラインの処理で行った。実験を通して、クローラロボットを用いることで、階段等につながれた多層構造の地下構造物の3次元地図を構築できることを確認した。地下街実験の詳細は、文献¹²⁾に譲る。

Disaster City では、3次元ジャイロベースドオドメトリで6自由度の位置と姿勢 $p = (x, y, z, \theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw})$ を推定した、建物の所々で計測した3次元点群を、オドメトリを初期値として、重力制約付きのICPマッチングでつなぎ合わせることで地図をオンラインで構築した。しかし、トンネルのなかなど、特徴の少ない場所では、マッチングに失敗することがあった。その場合は、操縦者が手で修正を行った。

Disaster City では、リアルタイムの地図構築を試みた。FEMAの隊員にも、計測した3次元点群を用いて内部の状況が把握できることを確認してもらった。一方、1.3次元点群になにが写っているのか、視点を動かさないと識別することが困難であること、2. ジャイロベースドオドメトリで計測した位置にロボットを描画すると、地面から浮き上がってしまうことや、逆に地面にめり込んでしまうことが観察された。これらの問題点の解決が今後の課題である。本実証実験の詳細は、文献¹³⁾に譲る。

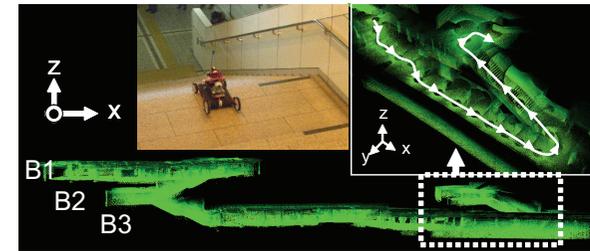


図 10 仙台市地下鉄の3次元地図
Fig.10 Sendai Subway 3-D Map

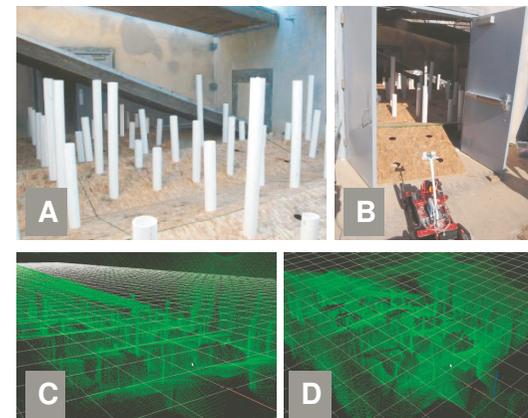


図 11 Tube maze 試験フィールド: (A) 試験フィールド, (B) 日中の日照条件で撮影した試験フィールド, (C)(D) 探索中に構築した3次元地図。
Fig.11 Tube maze test field: (A) field photo, (B) field photo captured in sunlight condition, (C) and (D) 3-D map constructed by the Kenaf during the exploration.

6. 現在取り組んでいる研究開発

計測した3次元点群の見やすさの向上と、位置推定の精度と地図構築の精度向上のため、下記の研究に取り組んでいる。本章では、各課題の概要を説明する。

(1) 細い物体を含む3次元点群の分類

3次元点群で表示された地図は、空間にある物を一目で認識することは困難である。

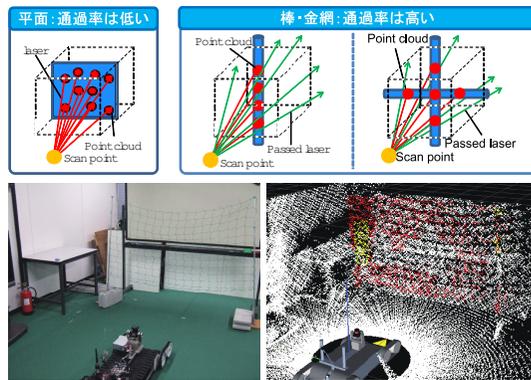


図 12 点群の固有値と通過率を用いた細い構造物を含む 3 次元点群の分類
Fig. 12 3-D Point Cloud Classification Using Passing Ray Rate and Eigen Vector

物体ごとに分類を行って表示を行うことで見やすさを向上させることができる。著者の研究グループでは、ボクセル空間に 3 次元点群をプロットし、各ボクセル内の点群の分布に注目して、壁、地面、瓦礫、細い物体の分類を行っている。特に、細い物体は、カメラにもとづく遠隔操縦では気づきづらいため、3 次元点群から検出することが有用である。一方、従来の点群の固有値にもとづく分類では、このような細い物と、壁などを識別することが困難であった。そこで、著者の研究グループでは、レーザ光線の通過率を用いて細い物の識別を行っている。図 12 に固有値と通過率を用いて点群から網を抽出した結果を示す。抽出された網が赤色で表示されている。従来の固有値による分類と組み合わせることで、細い物を含む 3 次元点群を、地面、壁、瓦礫、細い構造物に分類することができる。詳細は、文献¹⁵⁾に譲る。

(2) 地形を利用した位置推定精度の向上

ジャイロベースドオドメトリを用いることで、クローラロボットの 6 自由度の位置・姿勢を計測できるようになった。一方、サブクローラを有するクローラロボットでは、ジャイロベースドオドメトリの前提である、ロボットの本体の方向が、実際の進行方向ではないことがよく起こる。特に、サブクローラを下げて、本体を持ち上げて走行する際には、誤差が大きくなる(図 13 の右上)。この結果、3 次元操縦インタフェースを用いてロボットを操縦する際に、ロボットが空中に浮いてしまったり、地面にめり込んでしまうという現象が観察された。著者の研究グループでは、あらかじめ計測

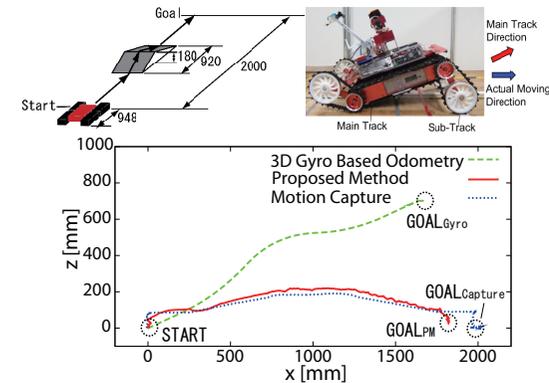


図 13 サブクローラを下げて走行した時の位置推定結果：実験環境 (左上)、サブクローラを下げた状態 (右上)、比較のグラフ (下)。

Fig. 13 Result of Position Estimation (The tracked vehicle moved lowering the sub-tracks): Experimental setup (Left-upper), Tracked vehicle state(Right-upper), Estimation results (Lower)

した 3 次元地形情報を用いることで、この誤差を修正する研究を行っている。図 13 に地形を用いて走行中の姿勢を修正した結果を示す。実験では、サブクローラを下げた状態で走行して位置を推定した。モーションキャプチャで計測した値と比較して、ジャイロベースドオドメトリでは空中に浮いてしまう場合でも、地形で修正することで浮かずに位置を推定できていることが確認できた。また、修正後の位置誤差を評価することで、高さ z だけでなく、他の成分も修正されていることを確認した。詳細は、文献¹⁶⁾に譲る。

(3) 複数台ロボットを用いた地図の統合

広範囲な災害現場を探索する場合、複数の探索ロボットを異なる入り口から入れて内部を探索することが考えられる。この場合、複数台のロボットが同時に収集した地図の情報を統合する仕組みが必要になる。著者の研究グループでは、スキャンマッチングと、グラフ SLAM を用いて、複数台のロボットが収集した 3 次元データを統合する研究を行っている。3 次元点群から壁だけを抽出することで 2 次元のスキャンデータを構築し、データを統合している。詳細は、文献¹⁷⁾に譲る。

7. ま と め

本稿では、著者らの開発している、クローラロボットを用いた不整地の 3 次元計測に関

して説明した．著者らの提案する Reticulate 方式の 3 次元レーザスキャナを用いることで，全周囲の均一で密な 3 次元形状を計測することが可能になった．また，3 次元ジャイロベースドオドメトリを用いることでクローラロボットの位置・姿勢を計測することができるようになった．開発したシステムの有効性を検証するため，仙台市の地下鉄や，米国 FEMA の訓練施設において，遠隔操縦による 3 次元計測を行った．これらの実証実験を通して，クローラロボットを遠隔地から操縦し，内部の地図を構築することが可能であることを確認した．一方，実際の環境で使用するためには，まだ多くの課題が残されていることも確認できた．これらを解決することが今後の課題である．

謝辞 本稿で紹介した 3 次元計測の成果は，NEDO のプロジェクト（代表：田所諭），JST さきがけ，科研費若手 B（代表：大野和則）の一部として行われた．3 次元スキャナのハードウェアは，ハーモニックドライブシステムズ社と北陽電気の協力のもと開発された．協力していただいたすべての方に謹んで感謝の意を表する．

参 考 文 献

- 1) Noah Snavely, Steven M. Seitz, Richard Szeliski: Photo tourism: Exploring photo collections in 3D, ACM Transactions on Graphics, Vol.25(3), pp.835–846 (2006).
- 2) Huijing Zhao, and Ryosuke Shibasaki: Reconstructing Textured CAD Model of Urban Environment using Vehicle-borne Laser Range Scanners and Line Cameras, Machine Vision and Applications, Vol.14, pp.35–41 (2003).
- 3) A. Morris, D. Kurth, W. Whittaker, and S. Thayer: Case studies of a borehole deployable robot for limestone mine profiling and mapping, In Proc. FSR (2003)
- 4) A. Banno, T. Masuda, T. Oishi, and K. Ikeuchi: Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project,” International Journal of Computer Vision, Vol.78, No.2-3, pp.207–222(2008).
- 5) Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Satoshi Tadokoro, Kazuya Yoshida, Keiji Nagatani, Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Shoichi Maeyama, Itsuki Noda, Osamu Takizawa, Yasushi Hada: A High Mobility 6-Crawler Mobile Robot ‘Kenaf’, Proc. 4th International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster (SRMED2007), p. 38(2007).
- 6) Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi: Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development, Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 225–230 (2010).
- 7) 大野和則，城間直司:レスキューロボットの遠隔操縦支援技術,” 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.169–172(2010).

- 8) J. Y. Wong. Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons (1978).
- 9) D. Endo, Y. Okada, K. Nagatani, and K. Yoshida: Path following control for tracked vehicles based on slip-compensating odometry. Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int’l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2871–2876 (2007).
- 10) NAGATANI, K., TOKUNAGA, N., OKADA, Y., and YOSHIDA, K.: Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain, Proc. of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.25–30(2008).
- 11) K. Ohno, T. Kawahara, and S. Tadokoro: Development of 3-D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3-D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment, Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.2161–2167 (2009).
- 12) Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida: 3-D Mapping of an Underground Mall Using a Tracked Vehicle with Four Sub-tracks, Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (2009).
- 13) Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida: Trials of 3-D Map Construction Using the Tele-operated Tracked Vehicle Kenaf at Disaster City, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2864–2870(2010).
- 14) 大野和則，桜田健，竹内栄二郎，小山順二，田所諭: 高速で密な形状計測を行う小型 3 次元レーザースキャナーの開発，ロボティクスメカトロニクス講演予稿集 (ROBOMECH2009),1A1-E04 (2009).
- 15) 畠 彰彦，大野 和則，竹内 栄二郎，田所 諭: 局所領域の形状特徴とレーザの通過率を利用した災害現場の 3 次元環境認識，第 28 回日本ロボット学会学術講演会,3I3-6 (2010).
- 16) K. Sakurada, E. Takeuchi, K. Ohno, S. Tadokoro: Development of Motion Model and Position Correction Method Using Terrain Information for Tracked Vehicles with Sub-Tracks, IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp.2511–2518 (2010).
- 17) Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Kazuya Yoshida, Seiga Kiribayashi, Kazunori Ohno, Eiji Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, “ Multi-Robot Exploration for Search and Rescue Missions. -A Report of Map Building in RoboCupRescue 2009-, ”Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (2009).