解説

レスキューロボットの地図構築

Mapping for Rescue Robots

大野 和 則^{*1} 永谷 圭 司^{*1} 秋 山 英 久^{*2} ^{*1}東北大学 ^{*2}産業技術総合研究所

Kazunori Ohno^{*1}, Keiji Nagatani^{*1} and Hidehisa Akiyama^{*2} ^{*1}Tohoku University ^{*2}AIST

1. 複数のクローラロボットによる地図構築

筆者らは、複数クローラロボットによる閉鎖建物内を高速に探索するロボットシステムの構築を行っている(図1)。地下街などの閉鎖空間内で複数のクローラロボットが個別に収集した情報を、ad-hoc ネットワークと有線を併用したハイブリッド通信システムを用いて Geographic Information System (GIS) に集約する。集約された情報は、建物内部の被災状況や被災者の状況を把握するのに使用する。

複数台の小型クローラロボットが、三次元の詳細な地図を構築することは難しい問題であることが知られている。理由は、クローラロボットの位置・姿勢を高精度に推定する方法が存在しないこと、ロボットの機動力を損なわないで広範囲を計測可能な小型レーザスキャナが存在しないこと、複数台のロボットが収集した情報を集約するポータブルな GIS が存在しないことがあげられる。筆者らは、位置推定の問題を三次元ジャイロベースドオドメトリ(2章)を開発することで、ロボットの全周囲の詳細な形状を三次元レーザスキャナ(3章)を開発することで解決した。計測した地形形状を推定位置に基づき重ね合わせることで三次元地図を構築した。また、複数台のロボットが集めた情報は推定位置に基づきポータブルな GIS (4章)に統合した。このように各問題を解決することで、2008年11月に兵庫県の三宮地下街で実証実験を行った[1]。本稿では、筆者らが開発した各要素に関して概要を説明する。

2. 三次元 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

図1 Multi-robots search system

能である。しかし、対象とするクローラロボットの場合、旋回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、対象とする環境が三次元である場合、位置推定も三次元的に行う必要がある。筆者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、三軸ジャイロスコープを利用した三次元オドメトリで解決した。

2.1 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旋回走行する際、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 $(\dot{x}, \dot{y})$ 、ならびに旋回速度 $\dot{\theta}$ は、式(1), (2), (3)と表すことができる[2]。

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

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

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

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(3)のみでは、二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(4)を導入する。

原稿受付 2009年12月23日

キーワード: Mapping, GIS, Gyro-based Odometry, 3-D Laser Scanner, Tracked Vehicle

^{*1}〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

^{*2}〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

^{*1}Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi

^{*2}Tsukuba-shi, Ibaraki

$$\frac{a_l}{a_r} = -\text{sgn}(v_l \cdot v_r) \sqrt{\left| \frac{v_r}{v_l} \right|}. \quad (4)$$

式 (4) と式 (3) 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 (4) 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 (1), (2) から、クローラロボットのオドメトリが実現される [3]。

2.2 三次元ジャイロベーストオドメトリ

筆者らは、ジャイロスコップを 3 台利用し、スリップ補償オドメトリを三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 (5) と表すことができる。 0q_n は、最初 0 のときを基準とした時刻 n のときの姿勢を、 ${}^nq_{n+1}$ は、時刻 n を基準とした時刻 $n+1$ のときの姿勢を表す。

$${}^nq_{n+1} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \sin \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, $\Delta\theta_z$ は、ジャイロスコップで獲得した 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 (6) で更新される。

$${}^0q_{n+1} = {}^0q_n \times {}^nq_{n+1}. \quad (6)$$

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、三次元な微小変位は、式 (6) を利用して、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ {}^np_{n+1} \end{bmatrix} = {}^0q_{n+1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta X_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times {}^{n+1}q_0 \quad (7)$$

と表すことができる。これにより、ロボットの位置は、

$${}^0p_{n+1} = {}^0p_n + {}^np_{n+1}. \quad (8)$$

と更新される。以上、式 (6) と (8) を利用することで、ロボットの三次元的な位置・姿勢を更新することが可能となる。

2.3 三次元ジャイロベーストオドメトリの基礎試験

三次元ベースト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 [m] であった。数回

図 2 One typical result of 3-dimensional gyro-based odometry

の計測より、どの結果についても、図 2 に示すように、三次元の自己位置が、ほぼ推定できていることが分かる。ただし、階段の上り下りによって、z 軸方向の推定値の誤差が生じている。これは階段を上り下りする際に、重力により下向きにスリップすることが原因である。

3. 三次元レーザスキャナ

3.1 開発した三次元レーザスキャナの特徴

二次元の形状が計測可能なレーザ距離計を振ることで、広範囲の三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に点の密度が集中してしまい、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る。また、人間がみて認識しやすい形状を計測することができるようレーザの軌跡を工夫する必要がある。筆者らはレーザ距離計の振り方を工夫することで、これらの問題を解決した。

開発した三次元スキャナ (TK scanner) の外形を図 3 に、性能を表 1 に示す。TK scanner は、(1) 小型軽量、(2) 水平 360 [deg]、垂直 130 [deg] の広範囲の三次元形状を計測、(3) 計測点群の密度の偏りを軽減、(4) 移動物体による誤差を軽減といった特徴を有している [4]。

3.2 三次元レーザスキャナの計測原理

TK scanner は、二次元レーザ距離計とパンチルト台から構成される。二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。

二次元のレーザ距離計から三次元の形状を復元する変換に関して説明する。センサ座標系と各種記号を図 3 のように定義する。パンチルト台のセンサを載せる台の回転中心は図 3 の O になり、これを三次元スキャナのベース座標系と定義した。また、二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

表 1 Specification of TK scanner

Distance [m]	max 8
View angle [deg]	360 (H), max 130 (V)
Weight [kg] & size [m]	0.9, (0.19 (W), 0.11 (D), 0.19 (H))
Time of 3D scan [s]	Between 5 and 20

図 3 TK scanner model and coordinates: O : scanner base coordinate, S : 2-D laser range finder coordinate, p : 3-D point on O

図 4 Laser point trajectory of TK scanner

角と定義する。座標 A と二次元レーザ距離計の座標 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、 $270[\text{deg}]$ の範囲を $0.36[\text{deg}]$ の角度分解能で二次元形状を計測する。レーザ光の向きと距離を 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 (9) で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{LRF}} & -\sin \theta_{\text{LRF}} & 0 \\ \sin \theta_{\text{LRF}} & \cos \theta_{\text{LRF}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{\text{LRF}} \\ 0 \\ L \end{pmatrix} \quad (9)$$

測域センサを座標系 A の y 軸まわりに $\beta = \text{const.}$ だけ傾けた状態で、座標系 O の z 軸周りに等角速度 $\dot{\gamma} = \text{const.}$ で 1 回転させて三次元形状を計測する。三宮地下街の実験では、約 $10[\text{s}]$ で全周囲の形状を計測した。

図 4 に変換式を用いて計算したレーザの軌跡を示す。レーザの軌跡は、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。TK scanner 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分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。

図 5 Scan data measured by TK scanner

4. GIS による情報集約

4.1 減災情報共有プロトコル

複数ロボットが収集する環境地図情報を地理情報システム (GIS) へ集約するには、ロボットと GIS の間で情報をやりとりするための通信プロトコルの共通化が必要となる。情報を集約するデータベースシステムはオンラインでの利用が前提である。災害や救助は動的な現象であるため、リアルタイムな要求をロバストに処理できるシステムが必要となる。また、データベースによって扱われる情報構造は、災害時に必要な様々な情報を表現できなければならない。そのため、通信プロトコルは、文字列や数値などの一般的なデータだけでなく、地理データ、時刻データ、画像などの非テキストデータ、構造化されたデータなども扱える必要がある。

これらの要求を満たす通信プロトコルとして、我々は減災情報共有プロトコル (MitigationInformation Sharing Protocol: MISP) [5] を採用した。MISP は、WFS (Web Feature Service) [6] に基づいた XML のプロトコルであり、GML (Geography Markup Language) [7], XML Schema などの各種標準を用いている。

MISP で扱う機能は一般的なデータベース管理システムと基本的に同じで、データの入力、検索、修正、削除が主なものとなる。MISP が WFS と大きく異なるのは、保存するデータの型をリアルタイム時に定義可能である点である。この柔軟性によって、レスキューロボットが収集する様々なセンサ情報を GIS 上で表現することが可能となる。

4.2 データベースシステム DaRuMa

筆者らは、情報を集約するデータベースとして、MISP に準拠した実装の一つである DaRuMa (DAta base for Rescue Utility Management) を開発している [8]。DaRuMa の構造を図 6 に示す。DaRuMa は、Java ミドルウェアと SQL サーバで構成されており、多くのプラットフォームで実行可能である。Java ミドルウェアが通信やプロトコルの処理を行い、MySQL ヘデータを格納する構造となっている。データの保持に広く利用されており実績のある MySQL を利用することで、大規模データの安定かつ高速な検索・操作が実現される。

図6 DaRuMa

図7 3-D view of scan data registered by 4 tracked vehicles

4.3 複数ロボットからのデータ登録

地図構築システムの実環境における性能を検証するため、神戸市三宮地下街、仙台、ロボカップレスキューロボットリーグで、実際のロボットと連動してデータ登録を行う実験を行った[1]。実験では、ロボット上のレーザ距離計で取得した三次元スキャンデータを、同時に1~4台のロボットからDaRuMaへ登録した。図7に三宮地下街での実験で登録されたデータの一例を示す。データ登録は一時間以上に渡って断続的に行われ、合計で150万個以上の点データのDaRuMaへの登録とビューワプログラム上での表示をオンラインで行うことに成功した[1]。

5. おわりに

本稿では、クローラロボットによる地図構築とGISへの情報統合を実現するために、筆者らが開発した要素技術に関して説明した。今後の課題は、位置推定に関しては、旋回を伴わないスリップを考慮した手法や、サブクローラで移動する際の動作モデルの構築が、三次元計測に関しては、高速に計測可能な三次元スキャナの構築が、GISに関しては、複数のロボットが取得した三次元地図データをGraphSLAMの枠組みを用いて一つの地図として統合することであり、現在それらの課題の解決に取り組んでいる。

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」の研究開発の一環として行われたものである。

参考文献

- [1] T. Yoshida, K. Nagatani, E. Koyanagi, Y. Hada, K. Ohno, S. Maeyama, H. Akiyama and S. Tadokoro: "Field Experiment on Multiple Mobile Robots conducted in an Underground Mall," Proc. of 7th Int'l Conf. on Field and Service Robotics, 2009.
- [2] J.Y. Wong: Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons, 1978.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 防災科学技術研究所, 産業技術総合研究所: 減災情報共有プロトコル, <http://www.kedm.bosai.go.jp/project/info-share/infosharp/>, <http://sourceforge.jp/projects/daruma/>
- [6] Open GIS Consortium, Inc.: OpenGIS Web Feature Service (WFS) Implementation Specification Ver.: 1.1.0, OGC 04-094.
- [7] Open GIS Consortium, Inc.: OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard Ver.:3.2.1, OGC 07-036.
- [8] 防災科学技術研究所, 産業技術総合研究所: DaRuMa, <http://sourceforge.jp/projects/daruma/>

大野和則 (Kazunori Ohno)

2004年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了, 博士(工学)。神戸大学COE研究員, 東北大学助教を経て, 現在東北大学大学院情報科学研究科講師, さきがけ研究員。ロボットの環境認識の研究に従事。日本ロボット学会研究奨励賞, 第3回競基弘章学術貢献賞受賞。IEEE, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

永谷圭司 (Keiji Nagatani)

1997年筑波大学大学院博士課程修了。カーネギーメロン大学機械工学科(ポストドクトラルフェロー), 岡山大学大学院自然科学研究科講師を経て, 現在東北大学大学院工学研究科准教授。フィールド移動ロボットの研究に従事。博士(工学)。IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)

秋山英久 (Hidehisa Akiyama)

2008年東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。独立行政法人産業技術総合研究所情報技術研究部門特別研究員。博士(工学)。マルチエージェントシステム, 災害情報システムの研究に従事。人工知能学会, 情報処理学会会員。