

測域センサと赤外線カメラを用いた三次元温度分布マッピングシステムの構築

3D Thermography Mapping for Mobile Robots using 3D SOKUIKI Sensor and Infrared Camera

大竹 一樹, 岡田 佳都, 永谷 圭司, 吉田 和哉 (東北大)

Kazuki OTAKE (Tohoku Univ.), otake@astro.mech.tohoku.ac.jp
Yoshito OKADA, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

In urban search and rescue situations, a 3D mapping technology by rescue robots is very useful to plan rescue missions. Furthermore, it is important to obtain temperature information for discovering victims in disaster scenes. Therefore, we set our research object to construct a 3D thermography map by mobile robots. To realize the above, we fuse both temperature image acquired from infrared camera and range data acquired from 3D SOKUIKI sensor. In addition, to improve a quality of the 3D thermography map, we propose improved ICP(Iterative Closest Point) scan matching algorithm using the temperature information applied to 3D scan points. Through initial experiments, we validated an advantage of our algorithm over traditional ICP scan matching. In this paper, we explain construction method of 3D thermography map, scan matching method using temperature information, and report an initial experiments.

Key Words : SOKUIKI sensor, Infrared camera, Scan matching

1 緒言

近年, 地震やテロ発生時などに, 二次災害による被害を軽減しつつ効率的な救助活動を行うため, 災害現場の初動探査を行うレスキューロボットの研究開発が盛んに行われている [1]. レスキューロボットの主な役割は, 要救助者の探索や現場状況の把握である. 特に, 被災者位置などの探査情報を的確にレスキュー隊員に伝達するために, 三次元環境地図の構築は, レスキューロボットの重要な技術課題の一つとなっている. 筆者らの研究グループでも, これまで, 測域センサ(レーザ距離センサ)を用いた三次元環境地図構築に関する研究を進めてきた [2].

また, 暗闇が予想される災害現場の探査において, 被災者や火災源を早急に発見するためには, 赤外線カメラの使用が有効である. 実際, 被災者探査技術を競う RoboCupRescue というロボットコンペティションにおいても, 多くのチームが, 赤外線カメラをロボットに搭載し, 熱源を持つ模擬被災者の探査を行っている [3]. ただし, このセンサから得られる情報は二次元情報であり, カメラ単体で熱源の三次元位置の特定を行うことはできない.

そこで, 本研究では, 測域センサにより取得した三次元距離情報と赤外線カメラから得た温度情報を組み合わせることで, 三次元温度分布マップを構築する手法を提案する. これにより, 災害現場の環境形状と温度情報を一目で把握することが可能となり, より効率的な探査活動に繋がることを期待できる.

一方, 広域の三次元環境地図を構築するためには, ロボットの自己位置推定が重要となるが, 不整地移動ロボットでは, 自己位置情報に誤差が生じやすいという問題がある. そこで, 逐次ロボットが獲得する三次元計測情報にスキャンマッチングと呼ばれる手法を適用して, 各計測地点間の相対距離を算出し, 自己位置の推定を行う手法が提案されてきた. しかしながら, 形状の特徴量の少ない環境では, この手法が必ずしもうまく機能しないと言われている. そこで, 本研究では, より正確な自己位置推定を実現するため, 温度情報を用いたスキャンマッチング手法を提案する. 具体的には, スキャンマッチング手法として広く用いられている ICP(Iterative Closest Point) を拡張し, 温度情報の特徴量に加えた手法を提案する. これにより, 幾何学的な特徴のない環境においても正確なマッチングを行い, 精度



Fig. 1 3D scanner

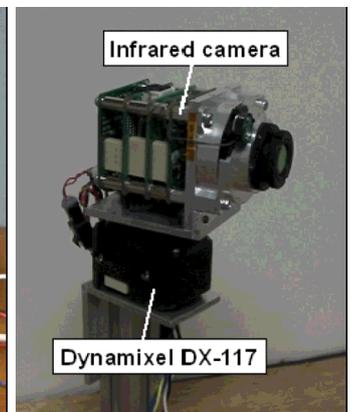


Fig. 2 Camera rotator

の高い自己位置推定が実現できることが期待できる.

本稿ではまず, 測域センサと赤外線カメラの統合による三次元温度分布マッピング手法について述べ, その後, 温度情報を用いた拡張型 ICP マッチング手法について述べる.

2 関連研究

スキャンマッチングとして有名な ICP 手法については, 多くの研究報告がなされてきた [4]. しかしながら, ICP マッチング手法は幾何形状を特徴量として用いるため, 幾何学的な特徴のない環境では, マッチング結果に誤差が生じるといった問題が存在する. そこで, このような問題に対処するため, 幾何形状以外の特徴量を用いた拡張型 ICP マッチングについて, いくつかの手法が提案されてきた.

Johnson らは, カラーカメラにより取得されたテクスチャ情報を用いた ColorICP を提案した. この手法は, 形状情報だけでなく, 色情報の特徴量に加えることで, 通常の ICP よりも正確なスキャンマッチングを実現している [5]. しかしながら, この手法では, 照明の影響を受けやすく, さらに, 暗闇が予想される災害現場での用途には不向きであると考えられる. 一方, 油田らは, 測域センサから得られる反射強度情報を用いた Intensity ICP を提案した [6]. この手法でも, 通常の ICP よりも正確なスキャンマッチングを実現した例が報告されているが, 反射強度が計測地点の位

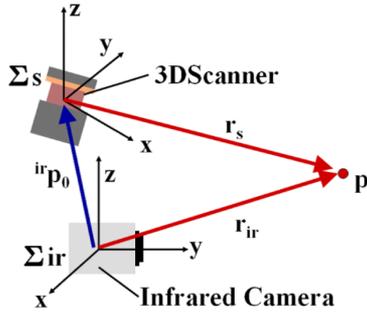


Fig. 3 Coordinate transform

置により変化してしまうという問題も存在する．本研究では，測定地点によって変化の無い温度情報を用いることで，正確な自己位置推定の実現を目指す．

3 三次元温度分布マッピング

本章では，測域センサにより取得した三次元距離情報と赤外線カメラで取得した温度分布画像を統合することで，三次元温度分布マッピングを行う手法について述べる．

3.1 三次元距離情報の取得

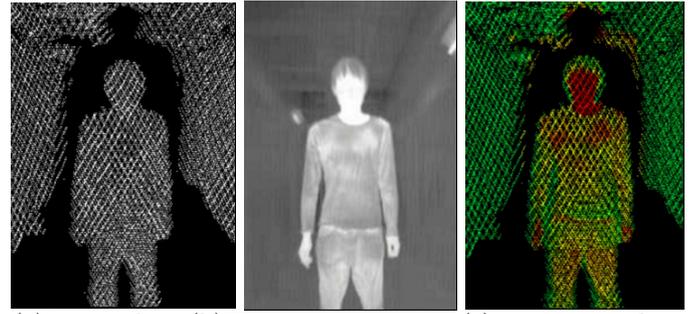
三次元距離情報を取得する手段としては，筆者らの所属する研究室で開発した三次元スキャナを用いることとした [7]．図 1 は，そのスキャナの概観図である．本スキャナは，二次元測域センサを斜めに傾けた状態で回転させることにより，三次元的にスキャンを行う．また，本スキャナは，水銀接点のロータリーコネクタを使用することで，測域センサを搭載した回転台を無限回転させることが可能である．なお，測域センサには北陽電機 (株) 社製の TOP-URG(UTM-30LX) を利用した．

3.2 温度分布画像の取得

赤外線カメラにより広範囲の温度分布画像を取得するために，スマートモータを利用したカメラの旋回機構を製作した (図 2)．このスマートモータには，ROBOTIS 社製の Dynamixel DX-117 を利用した．赤外線カメラには，NEC Avio 赤外線テクノロジー (株) 社製の赤外線カメラモジュール HX0830M2 を用いた．このカメラの水平画角は 50 度，垂直画角は 37.5 度であるが，垂直方向の撮影範囲を広く取るため，垂直方向の画角が 50 度となるように光軸を回転軸としてカメラを 90 度回転させて回転テーブルに取り付けることとした．

3.3 三次元距離情報と温度分布画像の統合

三次元温度分布マップは，三次元スキャナにより得られた計測点に温度値を割り当てることで作成する．具体的には，スキャナ座標系と赤外線カメラ座標系との位置関係から計測点をカメラ座標系で表した後，温度分布画像上での投影座標を求め，対応画素の温度値を計測点に当てはめていく．まず，図 3 に示すように三次元スキャナの座標系を Σ_s ，赤外線カメラの座標系を Σ_{ir} とする．また，計測点 p を Σ_s で表した三次元座標を $r_s = (X, Y, Z)$ ， Σ_{ir} で表した三次元座標を $r_{ir} = (x, y, z)$ とする．さらに， Σ_{ir} から見た Σ_s の位置，姿勢をそれぞれ ${}^{ir}p_0$ ， ${}^{ir}R_s$ とすると，



(a)Range data (b)Temperature image (c)Integration data

Fig. 4 Integration of the range data and temperature information

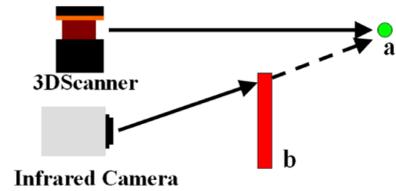


Fig. 5 Occlusion

同次変換により

$$\begin{bmatrix} r_{ir} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{ir}R_s & {}^{ir}p_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

が得られる．ここで，

$${}^{ir}p_0 = {}^{ir}R_s {}^s p_0, \quad {}^{ir}R_s = {}^s R_{ir}^T \quad (2)$$

より，

$$r_{ir} = {}^s R_{ir}^T (r_s + {}^s p_0) \quad (3)$$

が求まる．これにより，計測点を赤外線カメラ座標系で表現することが可能となり，カメラ画像上の対応する二次元座標を求めることができる．

図 4 に三次元距離情報に温度分布画像を統合した例を示す．座標系を，三次元スキャナを原点とし，計測対象である人間の方向に x 軸，鉛直上向きに z 軸，右手座標系となるように y 軸をとったとき，カメラ位置は $(x, y, z) = (128\text{mm}, 0\text{mm}, -77\text{mm})$ ，人間の最頂部が $(x, y, z) = (2500\text{mm}, 0\text{mm}, 700\text{mm})$ となる条件で計測を行なった．図 4(a) は，三次元スキャナにより計測した三次元距離データである．図 4(b) は，赤外線カメラにより獲得した温度分布画像であり，色が白い部分ほど温度が高いことを示す．これらを統合し，各計測点に対して温度情報を付加したものが図 4(c) である．緑色部は低温，赤色部は高温であることを示し，人間の顔面部が高温となっているのがわかる．ただし，本来低温であるはずの背景部分の計測点が一部高温となって表示されている．これは，三次元スキャナの位置と赤外線カメラの位置が完全に一致していないため，図 5 のように，カメラから計測できない点 a に対して手前にある物体 b の温度情報を割り当ててしまったためであると考えられる．

4 温度情報を用いたスキャンマッチング

本章では、通常の ICP マッチングを拡張し、温度情報を加味したスキャンマッチング手法の提案を行う。この手法を、本稿では、Thermo ICP と呼ぶこととする。

4.1 ICP マッチング

ICP マッチングとは、2つのスキャンデータの幾何形状を利用して、繰り返し計算によりスキャンデータ間の位置合わせを行う手法である。以下、ICP のアルゴリズムについて簡単に述べる。なお本稿では、マッチングの基準となる三次元スキャンデータを「基準スキャン」、新たに与えられるスキャンデータを「入力スキャン」と呼ぶ。

まず、与えられた座標変換値より入力スキャンの座標変換を行う。座標変換値の初期値には、通常オドメトリから得られる基準・入力スキャン地点間の相対位置を用いる。次に、入力スキャンの各点に対する基準スキャンの対応点を探索する。通常は最近接点、つまり点間距離が最も小さい点を対応点として選択する。次に、対応点間の評価関数が最小となるような座標変換値を求める。通常は評価関数として、対応点間距離の二乗和が用いられ、座標変換パラメータの算出にはニュートン法などが用いられる。座標変換パラメータが収束するまで、これらの手順を繰り返し、最終的な座標変換値、つまり、基準スキャンと入力スキャンの位置関係を求める。

4.2 Thermo ICP マッチング

通常の ICP マッチングでは、基準スキャンと入力スキャンの幾何形状を特徴量としてマッチングを行っているため、幾何学的な特徴のない環境では、マッチングに失敗する可能性がある。これに対し、本研究で提案する Thermo ICP では、幾何形状だけでなく赤外線カメラで取得した計測点の温度情報の特徴量に加える。そのため、幾何学的特徴のない環境であっても、温度勾配のある環境であれば、マッチングが可能となることが期待できる。以下に Thermo ICP のアルゴリズムについて述べる。

1. 基準・入力スキャンデータの読み込み

基準および、入力スキャンのスキャン点数をそれぞれ N, M とし、基準スキャン点群 P 、入力スキャン点群 Q を次のように表す。

$$P = \sum_{i=0}^{N-1} p_i, \quad Q = \sum_{i=0}^{M-1} q_i \quad (4)$$

ここで p_i は基準スキャン点情報であり、三次元ベクトル x_{pi} と温度情報 t_{pi} から成る。 q_i についても同様である。

$$p_i = \{x_{pi}, t_{pi}\}, \quad x_{pi} = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) \quad (5)$$

$$q_i = \{x_{qi}, t_{qi}\}, \quad x_{qi} = (x_{qi}, y_{qi}, z_{qi}) \quad (6)$$

2. 入力スキャンの座標変換

m 回目に行われる入力スキャンの座標変換は次式で表される。

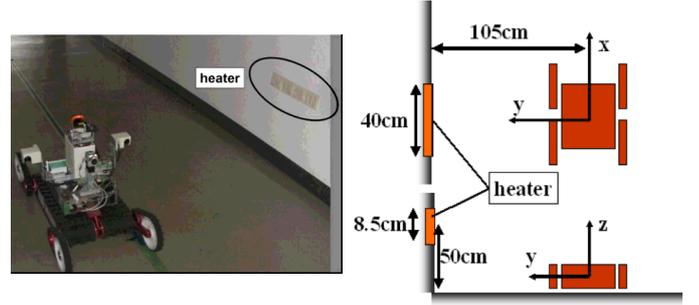


Fig. 6 Experimental setup

$$x_{qi}^m = R^{m-1} x_{qi}^{m-1} + t^{m-1} \quad (7)$$

ここで、 R, t はそれぞれ同次変換行列の回転成分行列、並進成分ベクトルである。座標変換値の初期値、つまり R^0, t^0 は、オドメトリ情報などから初めに与え、 $m=1$ 以降は、手順 4 で算出した座標変換パラメータである。

3. 対応点探索

入力スキャン点 q_i に対応する基準スキャン点 p_k を探索する。対応点探索では、対応点間距離に加えて温度値の差分も考慮し、以下の評価値 M が最小となる対応点を探索する。なお、探索には kd-tree を用いた。

$$M = |x_{qi} - x_{pk}|^2 + K_m |t_{qi} - t_{pk}|^2 \quad (8)$$

ここで、 K_m は温度情報の重み係数である。

4. 座標変換パラメータの算出

対応点間の評価関数が最小となるような座標変換パラメータ R, t をニュートン法により求める。評価関数 E は、対応点間の距離の二乗和に温度情報を加え、以下のように設定した。

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} \{|x_{qi} - x_{pk}|^2 + K_e |t_{qi} - t_{pk}|^2\} \quad (9)$$

ここで、 K_e は温度情報の重み係数である。

5. 繰り返し計算

座標変換パラメータが収束するまで手順 1 から 4 を繰り返す。

5 実験

Thermo ICP の有用性を確認するため、幾何学的特徴の少ない環境において、通常の ICP マッチングと Thermo ICP マッチングとの比較実験を行った。実験環境を図 6 に示す。この環境は、幾何学的特徴が少ないが、壁に熱源（使い捨てカイロ：平均温度 52℃）が貼られている。この環境に対し、本研究室で所有する小型移動ロボット Kenaf に三次元スキャナと赤外線カメラ回転ステージを搭載して、二回の計測を行なった。ただし、図に示す座標系において、一回目の計測位置を原点としたとき、二回目の計測は、 $(x, y, z, \text{yaw}) = (-200\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{mm}, 10\text{deg})$ の位置・姿勢で行った。図 7 にスキャンマッチング前の計測データを示す。基準スキャンと入力スキャンは全く重なっていないことがわかる。

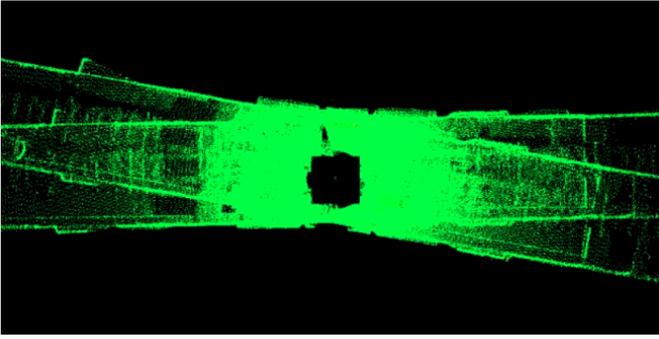


Fig. 7 Before scan matching

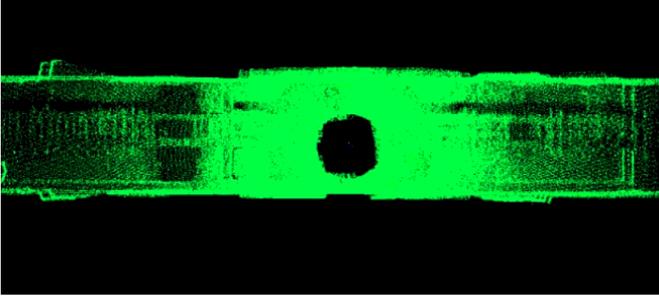


Fig. 8 ICP matching result

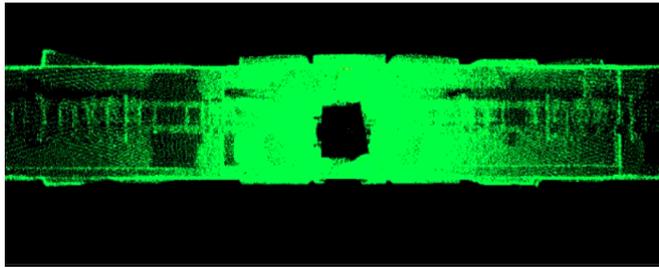


Fig. 9 Thermo ICP matching result

次に、初期座標変換パラメータを与えず、つまり $(x,y,z,yaw) = (0\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{deg})$ を初期座標変換値として入力してスキャンマッチングを行い、 x,y,z,yaw の4変数を求めた。まず、通常のICPマッチングを実行した。その結果を図8に示す。二つのスキャンデータが重なり、マッチングが成功しているように見える。しかしながら、算出された座標変換パラメータは、 $(x,y,z,yaw) = (-13.5\text{mm}, 0.0\text{mm}, -8.2\text{mm}, 10.7\text{deg})$ であり、 x 軸方向については正しい値 (-200mm) とは程遠い値となっている。これは、実験環境が廊下であるため、 x 軸方向に対して形状比較を行なうための特徴量が少なかったからであると考えられる。

次に、Thermo ICP マッチングを実行した。ただし、温度情報の重み係数は、 $K_m = 1.2$ 、 $K_e = 0.9$ とした。その結果を図9に、また、熱源部分の拡大図を図10に示す。図9を見ると、二つのスキャンデータが一致していることが見て取れる。また、座標変換値は、 $(x,y,z,yaw) = (-181.6\text{mm}, -7.3\text{mm}, -12.0\text{mm}, 11.3\text{deg})$ と算出された。 y,z,yaw に関しては多少誤差が現れたものの、 x 軸方向については通常のICPと比べ、大幅に改善された。この結果により、幾何学的な特徴の少ない x 軸方向に対して、温度情報の特徴量として用いることで、マッチングの精度が向上したと言える。

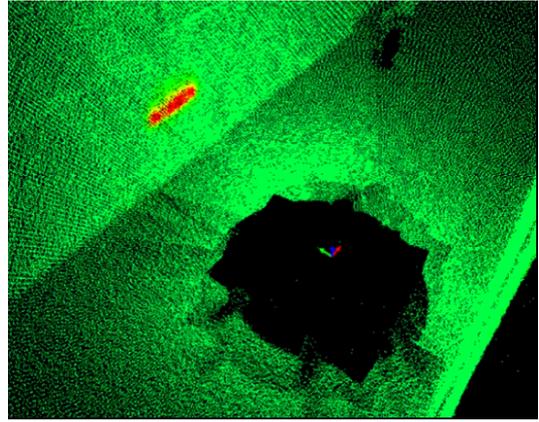


Fig. 10 Closeup of Thermo ICP matching

6 結言

本研究では、測域センサから取得される三次元距離データに赤外線カメラにより得られる温度情報を付加することで、三次元温度分布マッピングを行うシステムを構築した。また、ICP マッチングを拡張し、特徴量として温度情報を用いることで、幾何的特徴の少ない環境においても有用なスキャンマッチング手法の提案を行った。さらに、単純な環境ではあるが、提案手法の検証実験を行い、その有用性を確認した。

今後は、本システムを用いて実環境で実験を行い、より一般的な環境での提案手法の有用性を確認する予定である。また、熱源となる被災者は動くことが予想されるため、移動物体を考慮することで、動環境においても安定したマッチングを行う手法を提案していく予定である。

文献

- [1] Fumitoshi MATSUNO and Satoshi TADOKORO. "Rescue Robots and Systems in Japan". In proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pages pp.12-20, 2004.
- [2] Keiji NAGATANI, Naoki TOKUNAGA, Yoshito OKADA, and Kazuya YOSHIDA. Continuous Acquisition of Three- Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain. In proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pages pp.25-30, 2008.
- [3] Hiroaki Kitano and Satoshi Tadokoro. RoboCup Rescue A Grand Challenge for Multiagent and Intelligent Systems. AI Magazine Vol.22, No.1, pp.39-52, 2001.
- [4] S. Rusinkiewicz and M. Levoy. Efficient Variants of the ICP Algorithm. In proceedings of the International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pages pp.145-152, 2001.
- [5] Andrew Edie Johnson and Sing Bing Kang. Registration and Integration of Textured 3-D Data. Image and Vision Computing, vol.17, pp.135-147, 1999.
- [6] 原祥亮, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一. 測域センサの反射強度データを用いたスキャンマッチングによる移動ロボットの自己位置推定. Proc. of the JSME ROBOMECH '06, 2006.
- [7] 大竹一樹, 徳永直木, 永谷圭司, 吉田和哉. 移動物体検知のための高速三次元距離情報取得システムの構築. Proc. of the JSME ROBOMECH '10, 1P1-E01, 2010.