

動的環境における移動ロボットのための三次元温度分布マッピング

大竹 一樹, 岡田 佳都, 永谷 圭司, 吉田 和哉 (東北大)

3D Thermography Mapping for Mobile Robots in Dynamic Environments

Kazuki OTAKE, Yoshito OKADA, Keiji NAGATANI, and Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Abstract : In urban search and rescue situations, a 3D map obtained by rescue robots is very useful for plotting strategy of rescue missions. Furthermore, it is important for rescue missions to obtain temperature information for discovering victims in disaster environments. Therefore, in this research, we aimed to develop a 3D thermography mapping system by rescue mobile robots. In addition, to improve a quality of the 3D thermography map, we proposed a scan matching method in dynamic environments by removing moving objects. In this paper, we introduce our 3D thermography mapping and scan matching technique for mobile robots in dynamic environments, and report some experiments to confirm an advantage of the proposed methods.

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, 効率的な探査を行うため, 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, 要救助者の探査や現場状況の把握であり, 各種センサによる環境情報の取得や, 三次元環境地図の構築などが期待されている.

その中で筆者らは, 赤外線カメラによる温度情報取得に着目した. 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[2]. しかし, カメラによって獲得する画像は二次元情報であり, さらに, カメラを搭載したロボットは移動しているため, 熱源までの距離感が掴めないという問題がある.

このような背景のもと, 筆者らは過去に, 測域センサ(レーザ距離センサ)により獲得した三次元距離情報と赤外線カメラにより獲得した温度情報を統合することで, 三次元温度分布マップを構築する手法を提案した[3]. この手法により, 災害現場の環境形状と温度情報を一目で把握可能となり, より効率的な探査活動に繋がることが期待できる.

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, 自己位置推定に誤差が生じやすいという問題がある. そこで, ロボットが逐次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[4]. しかしながら, 歩行者がいるような動的環境においては, マッチングがうまく機能しないことが知られている. この問題に対しては, 三次元計測情報から移動体を除去した後に, スキャンマッチングを適用するという手法が有効である[5]. また, 筆者らは過去に, 高周期で三次元距離情報を取得可能なスキャナを開発し, 開発したスキャナを用いて移動体を検知する手法を提案した[6]. この手法を用いて三次元計測情報から移動体を除去した後, スキャンマッチングを適用することで, 動的環境において安定したマッチングが期待できる.

そこで本研究では, 三次元温度分布マッピング手法と移動体を考慮したスキャンマッチング手法を用いることで,

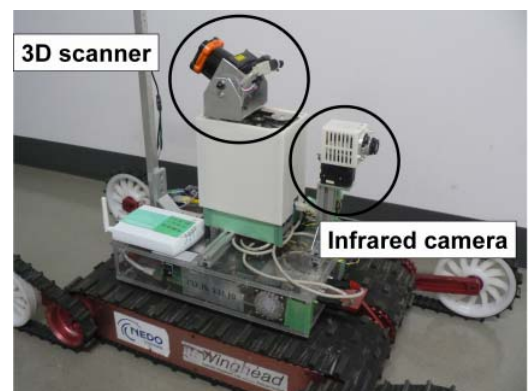


Fig. 1: Kenaf equipped with 3D scanner and Infrared camera

動的環境において広域の三次元温度分布マッピングを行うシステムを構築する. さらに, 本研究では, 迅速な探査を可能にするため, ロボットを走行させながらマッピングが可能となるよう, 旧手法を拡張することとした.

本稿では, まず, 移動ロボットを用いた三次元温度分布マッピングシステムについて述べ, 次に, 動的環境におけるスキャンマッチング手法について述べる. 最後に, 提案手法の有効性を確認するために行った予備実験ならびに広域環境でのマッピング実験について報告する.

2 三次元温度分布マッピングシステム

筆者らは過去に, 測域センサによって獲得した三次元距離情報と赤外線カメラによって獲得した温度情報を統合することで, 三次元温度分布マップを構築する手法を提案した. しかしながら, この手法では, マッピング時にロボットが静止している必要があった. そこで本研究では, 迅速な探査を可能にするため, 各センサ情報取得時のオドメトリ情報を利用して, ロボットが走行しながらでもマッピング可能となるように旧手法を拡張した. なおロボットは, 本研究室で所有する小型移動ロボットKenaf (図1)を使用し, オドメトリについては, 本研究室の岡田らが開発した三次元オドメトリを使用した[7]. 以下に, 拡張した三次元温度分布マッピング手法の手順を示す.

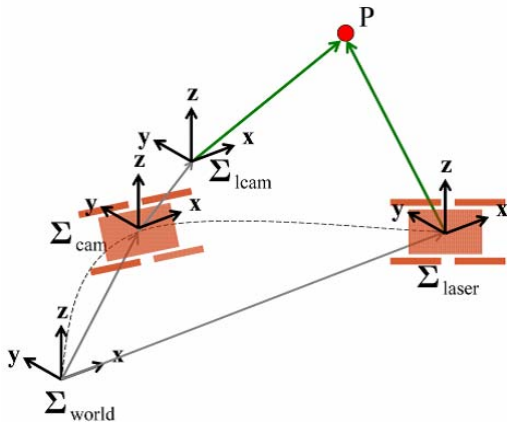


Fig. 2: Coordinate transform

2.1 アルゴリズム

三次元温度分布マップは、三次元スキャナによって獲得した計測点に、温度値を付加することにより作成する。温度値は、計測点を温度分布画像上に投影した時の対応する画素値を用いる。計測点对应する温度分布画像上での投影座標を求めるためには、計測点の基底となるスキャナ座標系と温度分布画像の基底となる赤外線カメラ座標系の位置関係を求め、適当な座標変換によって計測点をカメラ座標系で表現することが必要となる。つまり、図2に示すように、三次元距離情報取得時のロボット座標系を Σ_{laser} 、温度分布画像取得時のロボット座標系を Σ_{cam} 、 Σ_{cam} から見たカメラ座標系を Σ_{lcam} とした時、 Σ_{laser} で表された計測点Pを適当な座標変換によって Σ_{lcam} で表現する。このように計測点をカメラ座標系で表現することにより、カメラ画像上での投影座標を求めることができ、対応する画素値を計測点に付加することが可能となる。以下に、具体的な手順を述べる。

2.2 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た[6]。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。二次元測域センサには、北陽電機(株)社製のTOP-URG (UTM-30LX)を利用した。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でき、回転速度は最大180[rpm]まで自由に設定することが可能である。

2.3 温度分布画像の取得

赤外線カメラで広範囲の温度分布画像を取得するため、スマートモータを利用したカメラ回転機構を製作した。赤外線カメラには、NECAvio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。表1に赤外線カメラの主な仕様を示す。ただし、垂直方向の画角を広く取るため、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。

Table 1: Specification of the infrared camera

検出器	二次元非冷却センサ
画像データ画素数	320(H) × 240(V)
素子ピッチ	23.5 μm
測定波長	8 ~ 14 μm
FOV	50 ° × 37.5 °

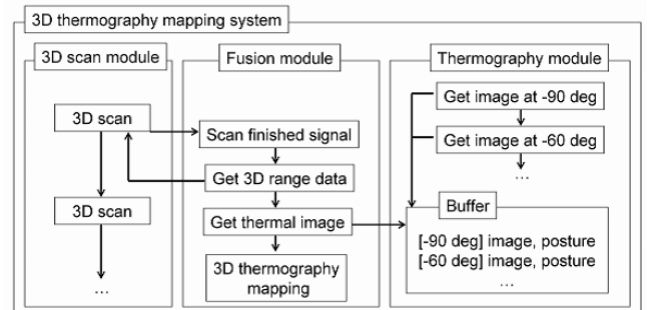


Fig. 3: 3D thermography mapping system

2.4 三次元距離情報と温度分布画像の統合

図3に三次元温度分布マッピングシステムの概要を示す。本システムは、三次元距離情報取得モジュール、温度情報取得モジュール、距離情報と温度情報の統合モジュールから成り、各モジュールは独立に処理を行う。

三次元距離情報取得モジュールは、スキャナにより三次元スキャンを続ける。ここで、スキャナの回転台が一回転する間のスキャンを三次元スキャンと定義する。本モジュールは、三次元スキャン終了時にスキャン終了シグナルを発信する。また、本研究室の徳永らが開発した逐次三次元環境取得システム[7]により、ロボット移動中にスキャンが可能であり、獲得する距離情報は、三次元スキャン開始時のロボット座標系で表現される。

温度情報取得モジュールは、旋回機構を有する赤外線カメラにより、-90度から90度まで30度間隔で(1)旋回動作、(2)目標角度で静止、(3)画像取得、を繰り返すことで広範囲の温度分布画像を取得する。画像取得時には、同時にオドメトリデータを取得する。また本モジュールは、各角度の画像情報とオドメトリ情報を保持するバッファを持ち、画像を取得した際に対象角度の情報を更新する。

統合モジュールは、まず、三次元距離情報取得モジュールからスキャン終了シグナルを受け取り、三次元距離情報を取得する。次に、温度情報取得モジュールから各角度における最新の温度分布画像を取得する。最後に、各画像について2.1節で述べた手法を適用し、三次元距離情報に温度情報を付加していく。

3 動的環境におけるスキャンマッチング

動的環境においてスキャンマッチングを行うためには、移動体の影響を考慮する必要がある。筆者らは過去に、三次元距離情報から移動体を検出する手法を提案しており、今回はこの手法を利用し、移動体と判定された計測点を除外してスキャンマッチングを行うこととした。本章では、移動体検知手法について概要を述べ、詳細については文献[6]に譲るものとする。

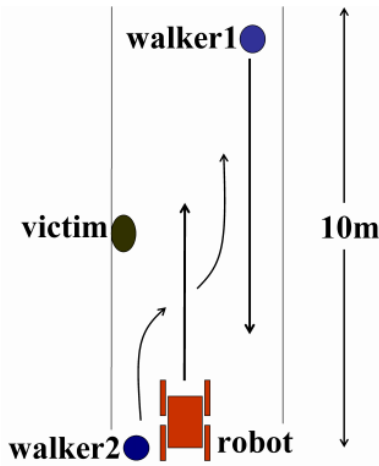


Fig. 4: Preliminary experimental environment

提案手法では、スキャナによって逐次獲得した三次元距離情報をvoxel形式に変換した後、時間方向に比較することで移動体の検出を行う。voxel形式とは、三次元形状を均一サイズの直方体(grid)の集まりで表現するものである。以下に具体的な手順を示す。

n 回目の三次元スキャンで得られたvoxelを $V(n)$ とする。 $V(n)$ は、各gridに対する計測情報 $v_{x,y,z}(n)$ から成る。 $v_{x,y,z}(n)$ は、論理型の変数であり、位置 (x, y, z) のgridに対して、計測が行われていれば $v_{x,y,z}(n) = true$ 、行われていなければ $v_{x,y,z}(n) = false$ で表現される。 $V(n)$ に対して直近の m 回分のスキャンデータを用いて移動gridの検出を行う場合、 $v_{x,y,z}(n) = true$ のgridに対し、 $v_{x,y,z}(n-1), v_{x,y,z}(n-2), \dots, v_{x,y,z}(n-m)$ を参照し、それらがすべて $false$ ならば移動grid、一つでも $true$ があれば静止gridとする。つまり、過去 m 回分の三次元スキャンで一度でも計測が行われていれば静止grid、一度も計測が行われていなければ移動gridと判定する。このようにして対象voxelに対して移動体判定を行った後、各計測点をポイントクラウド形式で表現し直すことで、移動体検出を行う。

4 実験

4.1 予備実験

4.1.1 実験条件

提案手法の有効性を確認するため、歩行者のいる環境で三次元温度分布マップを構築し、移動体を考慮したスキャンマッチングを適用する予備実験を行った。実験環境は図4に示すように、廊下に歩行者1、歩行者2、座っている被災者が存在する。ロボットは図のように走行しながら温度マップを作成した。移動体検知には $10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}]$ のvoxelを用い、比較する過去のスキャンデータ数は $m=2$ とし、スキャンマッチングには一般的に広く用いられているICPマッチング手法[8]を用いた。

4.1.2 結果と考察

まず、スキャンマッチングを適用する前の温度分布マップを図5に示す。図中の座標軸は、ロボットスタート時の姿勢であり、見やすさのため、天井と床の表示は省いた。図から被災者の温度が高いことが見て取れ、ロボットを走行させながら正しくマッピングができていることが確認できた。

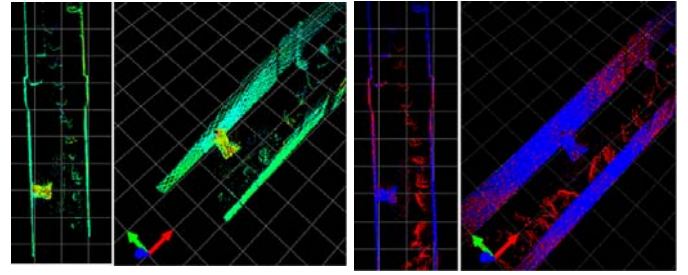


Fig. 5: 3D thermography Fig. 6: Moving object de-mapping result

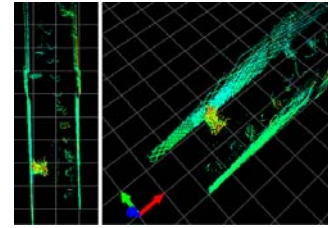


Fig. 7: Matching result

次に、移動体検知を行った結果を図6に示す。図中の青い部分が静止物体、赤い部分が移動物体と判定された点群である。移動体検知では、歩行者を移動体として検知できているが、観測地点から遠い部分やロボットの走行に伴って新たに計測された部分についても移動体として判定されている。しかしながら、移動体のみならず、ロボットの走行に伴って新たに計測された部分については、スキャンマッチングに悪影響を及ぼすため、これらをまとめて除去することで、安定したマッチングの実現に繋がると考えられる。

次に、移動体を考慮してスキャンマッチングを適用した結果を図7に示す。図5と比べると、マッチング適用前とほとんど変化が見られない。これは、オドメトリの誤差が非常に小さかったためであると考えられる。一方、移動体を考慮せずにマッチングを適用した場合には、結果が収束せず、マッチング不可能という結果となった。

以上の結果から、ロボットを走行させながらの三次元温度分布マッピングの有効性を確認した。また、動的環境においてスキャンマッチングを行う場合には、移動体を除去することが必須であり、提案手法によるマッチングが有効であることを確認した。

4.2 広域環境でのマッピング実験

4.2.1 実験条件

次に、本研究室の居室三部屋および廊下を含む広域環境において、被災者が三人おり、捜査中に人がロボットの脇を通り過ぎるというシナリオを想定し、三次元温度分布マップを構築する実験を行った。実験環境の簡略図を図8に示す。被災者1はroom1に、被災者2は廊下に、被災者3はroom2にそれぞれ存在する。被災者3の近くには電気ポットが置かれており、熱を発生している。さらに、ロボットがroom2からroom3へ向かう途中で歩行者がロボットの脇を通り過ぎる。

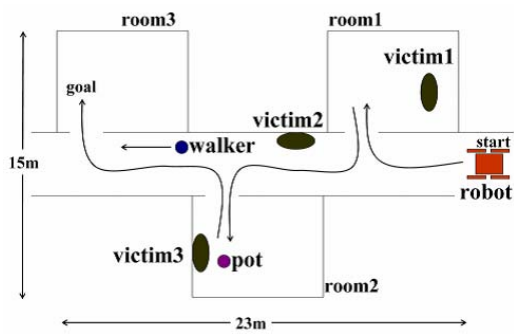


Fig. 8: Wide-area mapping experimental environment

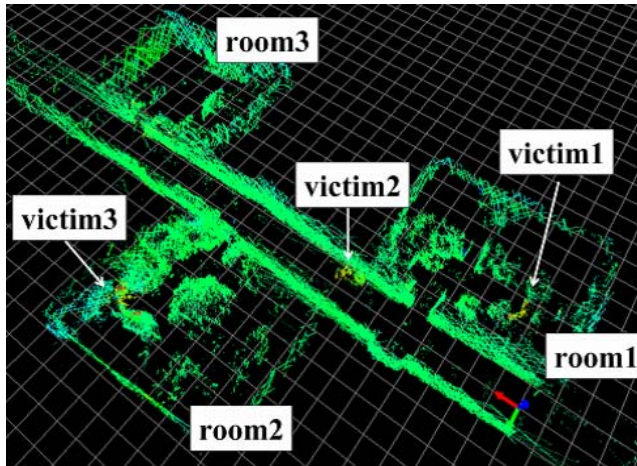


Fig. 9: Wide-area mapping result

4.2.2 結果と考察

構築した三次元温度分布マップの俯瞰図を図9に示す．さらに、被災者1, 2, 3についてマッピングされた様子と、赤外線カメラによって獲得した画像を図10, 11, 12にそれぞれ示す．それぞれの図より、被災者についてほぼ正確に温度マッピングがされており、被災者の位置や状態を一目で確認することができる．一方、図ではわかりづらいが、歩行者の背後の壁に一部高温となっている部分が見られた(図13)．これは、温度画像に歩行者が写りこみ、歩行者が通り過ぎた後もその背後に歩行者の温度がマッピングされてしまったためである．この問題に対処するためには、温度画像取得時に移動体が写りこんだ場合、その部分の温度値を信用しないようにするなどの処理が必要であると考えられる．

5 結言

本研究では、三次元測域センサと旋回機構付赤外線カメラを搭載した移動ロボットを用い、動的環境において広域の三次元温度分布マッピングを行うシステムを構築した．これにより、三次元距離情報と温度分布画像を、ロボットのオドメトリ情報を考慮した上で統合することができ、ロボットを走行させながら温度マッピングが可能となった．さらに、獲得した三次元距離情報から移動体を検出し、移動体を除去した上でスキャンマッチングを行うことで、動的環境においても安定したスキャンマッチングを行う手法

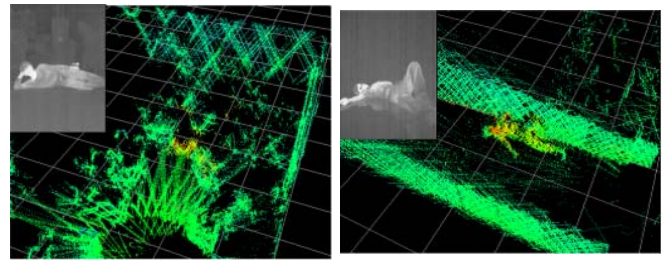


Fig. 10: Closeup of victim1 Fig. 11: Closeup of victim2

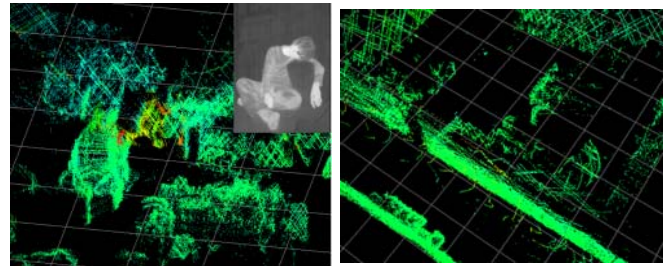


Fig. 12: Closeup of victim3 Fig. 13: Closeup of walker

を提案した．

参考文献

- [1] F. Matsuno and S. Tadokoro, "Rescue Robots and Systems in Japan," 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 12-20, 2004.
- [2] K. Nagatani et al., "Multirobot exploration for search and rescue missions: A report on map building in RoboCupRescue 2009," Journal of Field Robotics, vol. 28, no. 3, pp. 373-387, 2011.
- [3] 大竹一樹, 岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉, "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," Proc. of the JSME ROBOMECH '11, 1P1-E03, 2011.
- [4] G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. F. Durrant-Whyte, and M. Csorba, "A Solution to the Simultaneous Localisation And Map Building (SLAM) Problem," IEEE Transactions of Robotics and Automation, 2001.
- [5] D. Hahnel, R. Triebel, W. Burgard, and S. Thrun, "Map building with mobile robots in dynamic environments," 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1557-1563.
- [6] 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.
- [7] K. Nagatani, N. Tokunaga, Y. Okada, and K. Yoshida, "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain," 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp. 25-30, Oct. 2008.
- [8] Y. Chen and G. Medioni, "Object modeling by registration of multiple range images," Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2724-2729, 1991.