

# 災害現場におけるセンシングを用いた ロボットの自律的運用技術

石山 俊彦\*

## 論文要約

災害現場での行方不明者の捜索や周辺環境の調査を目的に、ロボットが自立的に移動するための要素技術を検討した。本研究では、レスキューロボットを想定したクローラー型のロボットに様々なセンサを搭載した。カメラやセンサの設置場所を検討することで、設置場所により得られる情報が異なることを確認した。レーザーセンサを用いることで、簡易的なSLAMを実現できることも確認した。

キーワード：レスキューロボット，自律，災害，センシング，SLAM

## Autonomous Robot in Disasters using Sensing Technology

Toshihiko ISHIYAMA\*

## ABSTRACT

The autonomous robot system is examined to search missing persons at the disaster site. Various sensors were equipped on the crawler-type robot rescue robot. By considering location of sensors, various information can be obtained. By using a laser sensor, a simple SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) system could also be obtained.

**Keywords** : *Rescue robot, Autonomous, Disaster, Sensing, SLAM*

## 1. 緒言

東日本大震災と引き続いて発生した福島第一原子力発電所事故において、レスキューロボットが投入された<sup>1)</sup><sup>2)</sup>。それに先だって発生したNY同時多発テロ事件や中越地震などにおいてもレスキューロボットは運用されたものの<sup>3)</sup>、わが国において行政や企業を巻き込んだ本格的な運用は初めてといえる。レスキューロボットが人の立ち入りが困難な場所で調査活動を行い、得られた調査結果が報道されたことで、その有効性が高く評価されている。こうしたことをふまえ、災害発生後の情報収集や救助活動などを目的としたロボット支援技術が検討されている<sup>4)</sup>。

レスキューロボットの運用は、これまで、人による操作が主流であった。しかし、被災現場では瓦礫が積み上がり、混乱した状況にある。また、被災した建物内部などの現場では十分な照明が得られるとは限らない。レスキューロボットは搭載したカメラから得られた情報をもとに、遠隔地にいる操作者が運転するが、このような状況下では、操作者がロボットの周辺環境を把握することは難しい。さらに、カメラに映る画像をもとにした搜索活動では、瓦礫に埋まっている行方不明者を見逃す可能性もある。

こうしたことから、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) などの手法を用いて<sup>5)</sup>、周辺環境の把握から行方不明者の搜索にいたるまでをロボットで自立的に運用することができれば、搜索活動自体をロボットに任せることができる。また、操作者はロボットが自立的に動作する間、カメラを通じて行方不明者の搜索に専念することができる。

本研究では、レスキューロボットを想定したクローラ型ロボットに様々なセンサを搭載した。センサの設置場所を検討することで、場所による効果を評価した。また、得られた地図データをもとに、経路探索についても検討した。

## 2. レスキューロボットと位置探索

### 2.1. レスキューロボットとセンシング

レスキューロボットは、倒壊建物内部など、人間が立ち入れない場所に入り込む。レスキューロボットのような自律移動ロボットには、被災構造部や月面に関する詳細な情報がない状態での探査が要求される。そのため、ロボットは周囲の状況に関する詳細な情報の入手を第一のタスクとする。

図1に、レスキューロボットおよび搭載センサを示す。レスキューロボットはロボカップレスキューなどで用いられている米国製のリモコン動作のクローラ型ロボットを使用している。ロボットには、レーザーセンサ、カメラ、赤外線センサ、ノートPCが搭載されている。以下

に、各センサの役割を示す。

#### ・レーザーセンサ

レーザーセンサ (レーザー距離計) は、ロボットの周辺環境を調査することで、周辺環境の状況や通行可能箇所などを探ることを目的としている。センサデータを加工することで、地図を作成し、ロボットの経路計画に利用できる。従来、レーザーセンサは北陽電機の製品が用いられてきた<sup>6)</sup>。近年は、Microsoft社製の安価なゲーム機用のレーザーセンサ (商品名: Kinect) も用いられるようになってきた。

#### ・カメラ

カメラは、離れた場所にいる操作者が実際に周辺の状況を観察したり、行方不明者を搜索したりすることができる。レスキューロボットは車高が低いため、カメラの設置高さが変わると、得られる情報も異なる事に注意すべきである。

その他、IR (Infra Red) センサは、生物が放出する赤外線を検出する。これにより、眼視に頼らなくとも、行方不明者の搜索を行うことができる。



図1 レスキューロボットと搭載センサ

### 2.2. 周辺情報の収集と経路探索技術

ロボットが周辺情報を収集し、通行可能な箇所を探索しながら、建物内部を移動する。上述のように、ロボットには、あらかじめ建物内部の情報が与えられていない。そのため、ロボットは自らが収集した周辺情報をもとにして、建物内部を探索するための経路を設計する必要がある (経路探索)。

経路を探索するためには、地図、自身の位置 (スタート) と目的地 (ゴール)、探索アルゴリズムが与えられる必要がある。以下に、各要素について説明する。

#### ・地図

レーザーセンサは、周辺環境の形状を測定することができる。測定結果をもとに、コンピュータ上で周辺環境の地図を作成することができる。

ロボットは、自身の位置を原点として壁や障害物など

の周辺環境をレーザーセンサで検出し、地図データとする。

・自身の位置と目的地

自身の位置（スタート地点）と目的地（ゴール地点）を決めることで、経路を探索することができる。経路探索や移動は、ロボット自身の地図上で位置を知ることから始まる。

ロボット自身の位置は、自らがレーザーセンシングにより作成した地図の場合、原点とする場合が多い。一方、あらかじめ地図が与えられた場合は、ランドマークをもとにして、自身の位置を決めることになる。

ロボットの目的地は、調査の目的により決定される。例えば、特定箇所の観察など、与えられた目的により目標地点も定まる。ただし、行方不明者の捜索など、経路上の周辺調査も重要になる場合もある。

・経路の探索

自身の位置（スタート地点）と目的地（ゴール地点）が決まれば、目的地までの経路を探索する。ロボットは、スタートからゴールまでの区間を、アルゴリズムにより決められた経路を移動する。スタートからゴールまでの区間の移動については、「片道（往路のみで、帰路を考慮しない）」、「往復（往路と帰路で同じ経路を移動する）」、「周遊（往路と帰路で違う経路を移動する）」などが考えられる。この他にも、スタート-ゴール間で、様々な場所に移動するなど、調査のための移動方法が考えられる。なお、「片道」については、倒壊した建物内部の調査のように、帰路の安全性が確保されない場合が考えられる。その場合、調査の重要性を考えれば、ロボットは回収できない可能性があっても調査を実施する事があり得る。福島第一原子力発電所事故では、レスキューロボットが帰路や調査中にケーブルに絡まったり、障害物に挟まるなどで回収不能になっている<sup>7)</sup>。

経路の探索手法は、迷路脱出アルゴリズムやダイクストラ法（最短経路問題）などのアルゴリズムをもとに<sup>8)</sup>、調査目的（目的地までの経路周辺の調査など）を考慮して決定する。

### 3. 実験方法

#### 3.1. センサを利用した地図化手法

図2に、レスキューロボットに搭載したセンサで得られる情報をもとにした地図化手法を示す。レスキューロボットに搭載したレーザーセンサにより、周辺情報を3次元データ化する（図2 (b)）。そののち、座標変換をおこない、測定データを鳥瞰した状態にすると、現場の地図を得ることができる（図2 (c)）。

レスキューロボットへのレーザーセンサには、Microsoft社のKinectを用いた。Kinectの測定点は、床から25cmの高さとした（図1）。レスキューロボットには行方不明者捜索のため、カメラと赤外（IR）セン

サも搭載した。本検討では、カメラとして、画像データを無線伝送できるピンホールカメラ（TC-9）を使用した。また、IRセンサとして、焦電レンズ付のIRセンサキットを使用した。ノートPCについては、レーザーセンサで取得したデータの解析や搭載バッテリーを利用したセンサへの電力供給など、今後の利用を予定している。

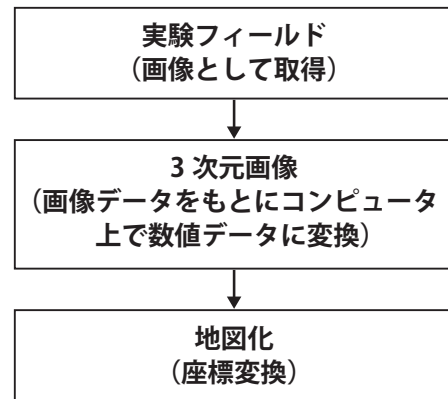


図2 レスキューロボット搭載センサによる地図化手法

#### 3.2. 経路探索の手法

3.1節で述べた手法で作成した地図をもとに、レスキューロボットが調査する経路探索の方法について説明する。レスキューロボットに搭載したレーザーセンサにより得られた現場の地図上で、ロボットの経路を探索する。以下の点を、経路探索の前提とした。

- ・ロボットのスタート地点は、地図領域の下方中央部とする。
  - ・移動は、x-y座標系の格子点上を移動する。
  - ・ロボットが進む方向は直線ベクトルで示し、到達すべきゴール地点は直線ベクトル上の最遠地点とする。
- ロボットの経路探索アルゴリズムは、文献9)をもとに、幅方向探索とした。なお、シミュレーションでは、ロボットは「点ロボット」を仮定し、ロボットのサイズや並進により、移動が妨げられることがないものとした。具体的には、以下のアルゴリズムにより、ロボットは移動するものとした。
- ・直線ベクトル上の最遠の点をゴール地点と見なして、移動する。
  - ・y軸方向への移動をもとに、障害物を検出した場合は、x軸上を移動することで、障害物を回避する。
  - ・障害物が無くなり、y軸方向の経路が見つかれば、直線ベクトルに沿うように移動する。
  - ・移動の過程で自身の位置（x座標）が、ゴール地点より小さい場合はx座標が増加する方向に、ゴール地点より大きい場合はx座標が現象する方向に移動するものとした。図3に、移動アルゴリズムの一部を示す。

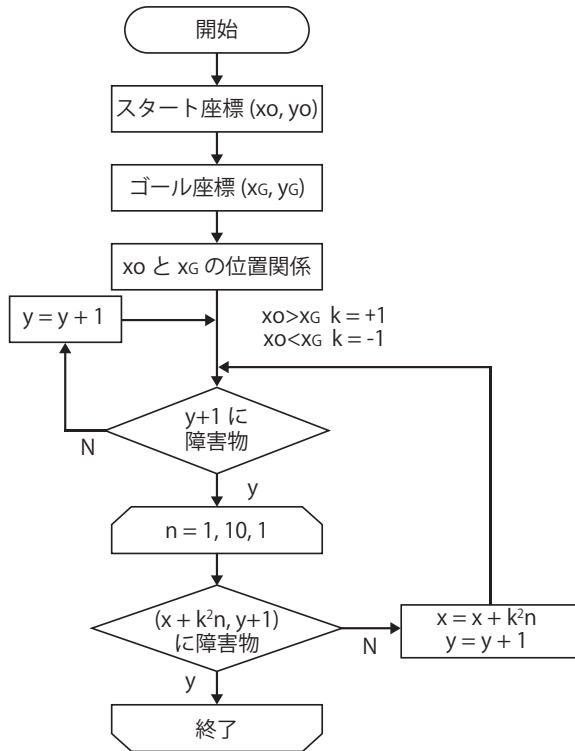


図3 経路探索アルゴリズム (一部)

#### 4. 結果と考察

実験結果をもとに、センサによる地図化と経路探索手法について検討した。

##### ・カメラ

図4に、レスキューロボット上のカメラ搭載高さを変えた時の画像を示す。図4 (a)は地上8 cmの高さ、図4 (b)は地上39 cmの高さに、カメラを設置した。

カメラを地上8 cmと極めて地面に近い場所に設置した場合(図4 (a))は、地面付近の障害物をとらえることができる。俯瞰できる高さが無いことから、周囲の環境について把握することは難しいものの、グレーチングのようにロボットが移動し難い床材や床上の障害物や瓦礫の発見に効果がある。

カメラを地上39 cmに接地した場合は、床上の障害物や瓦礫などを詳しく把握することはできないものの、周囲の環境を把握することができる。

倒壊建物の中でロボットが活動するためには、1台のカメラだけでは困難である。例えば、福島第一原子力発電所に投入されたQuinceには俯瞰カメラ、アーム搭載カメラ、後方カメラなど、3台程度のカメラが搭載されたことから、数台のカメラを搭載すべきことが分かる<sup>10)</sup>。その場合でも、高さを含めた設置場所を検討することで、効果の有無が分かることに注意すべきである。また、カメラとIRセンサを連携させることで、眼視による検索だけでは見落とす可能性のある行方不明者の発見に効果があるものと期待される。



図4 カメラ設置高さによる視野の比較

##### ・レーザセンサによる地図化

ロボットの先に長い廊下がある場合の、測定データの地図化についての検討結果を示す。図5 (a)は、ロボットに搭載されたレーザーセンサにより取得された3次元データである。

このデータからでも、経路を推定することは可能であるが、図5 (b)のデータを鳥瞰図となるように座標変換することで、地図として利用可能な画像が得られる。

図5 (b)より、進行方向には進路が広がっていることや、右手に分かれ道があることが分かる。また、壁の近くには障害物があることも示された。安価なレーザーセンサを用いることによっても、簡易的なSLAMが実現できている。こうしたデータをもとにすることで、レスキューロボット周辺の環境を地図化し、経路探索に役立てることができる。

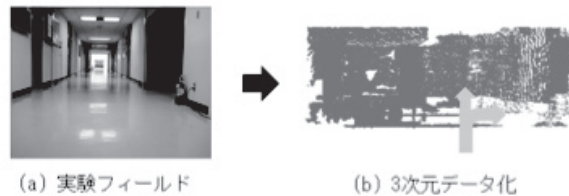


図5 レーザセンサによる周辺環境の地図化

##### ・経路探索の結果

図6に、幅方向探索による経路探索のシミュレーション結果を示す。シミュレーションのフィールドは、10 × 10のフィールドを想定し、内部に、経路探索の障害となるよう、障害物を配置してある。本検討では、地図作成の現場が片付いた廊下であったため、ロボットの移動には簡単すぎた。そのため、フィールドを10 × 10の格子に分割し、障害物が巻かれた状態を仮定し、シミュレーションを実施した。ロボットはフィールド内の格子点を移動するものとした。また、ロボットは「点ロボット」を仮定し、移動のための旋回半径などは必要としなかった。

シミュレーションの結果から、簡単なアルゴリズムをもとに、ゴールに達することが示された。それほど複雑な経路で無ければ、自らが作成した地図をもとに移動経路を計算できることが分かる。ただし、旋回半径を必要としない「点ロボット」を仮定したことや、経路上に瓦礫などの障害物が散乱した場合の移動などについては、引き続き検討を要する。



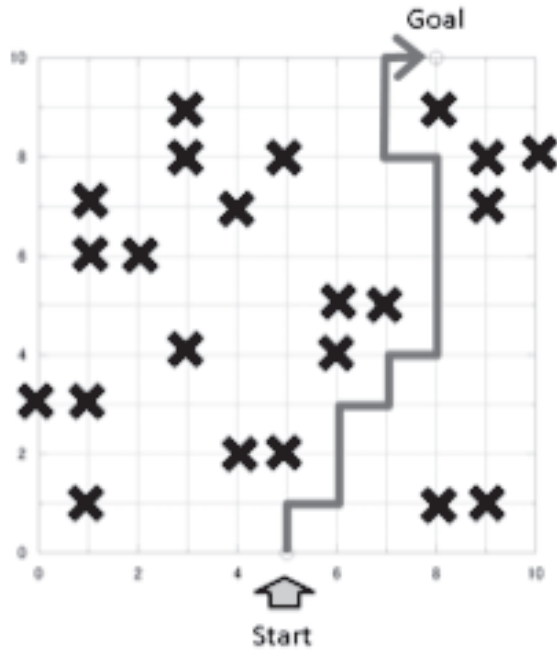


図6 経路探索結果

## 5. まとめ

災害現場での行方不明者の捜索や周辺環境の調査を目的に、ロボットが自律的に移動するための要素技術を検討した。本研究では、レスキューロボットを想定したクローラー型のロボットに様々なセンサを搭載した。カメラやセンサの設置場所を検討することで、設置場所により得られる情報が異なることを確認した。レーザーセンサを用いることで、簡易的なSLAMを実現できることも確認した。

得られた地図データをもとに、簡単なアルゴリズムで建物内部の移動経路を探索できることを示した。今後は、旋回半径を必要とする実際のロボットへの適応や、瓦礫等が散乱した状況の建物内部での探索について検討を進める。

## 参考文献

- 1) 東日本大震災関連調査研究委員会／原子力関係記録作成分科会：「原子力ロボット記録と提言」、日本ロボット学会、2013。  
<http://www.rsj.or.jp/committees/shinsai>
- 2) 例えば、「米の水中探査ロボ、不明者捜索 海中の様子も調査」、朝日新聞 web サイト、2011。  
<http://www.asahi.com/special/10005/OSK201104210013.html>
- 3) R. R. Murphy, 牧田忍 [訳]：ニューヨーク世界貿易センター（WTC）でのレスキューロボット、日本機械学会誌、Vol. 106, No. 1019, pp. 794-802, 2003.
- 4) 田所諭：大都市大震災軽減化特別プロジェクトで開発されたロボット技術、建設の施工企画、Vol. 703, No. 9, pp. 44-49, 2008.
- 5) M. Montemerlo et al., FastSLAM, pp. 1-11, Springer (Berlin), 2007.
- 6) 測域センサ - 商品一覧（北陽電機株式会社）  
<http://www.hokuyo-aut.co.jp/search/index.php?cate01=1>
- 7) 東京電力：福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部調査の状況について（2015年4月12日）  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/2015/1249672\\_6818.html](http://www.tepco.co.jp/cc/press/2015/1249672_6818.html)
- 8) 矢沢久雄：アルゴリズム&デザインパターン、日経BPマーケティング、pp. 58-59, pp. 102-105, 2016.
- 9) M. Berg and O. Cheong, Computational Geometry, Springer (Berlin), 2008.
- 10) 小柳栄次：災害対応ロボット Quince の開発と課題、工業教育資料、No. 340, pp. 8-13, 2011.