

自律移動ロボットによる人避け動作のための環境地図構築

Map Construction for Human Avoidance of Autonomous Mobile Robot

秋山英久 進藤真 荒牧重登

Hidehisa AKIYAMA Makoto Shintou Shigeto ARAMAKI

福岡大学

Fukuoka University

akym@fukuoka-u.ac.jp

概要

In this paper, we propose a method to construct an environment map by autonomous mobile robot to solve the human avoidance task. The method is based on Digital Elevation Model and we introduce the decremental model in order to eliminate ghost obstacles generated by moving bodies. We implemented our method on the mobile robot Roomba with Laser Range Finder and Kinect compatible device as sensor devices. We conducted two experiments to determine the suitable parameters of our method.

1 はじめに

近年、ロボットは人間の生活に密接に関わるようになってきた。今後、ロボットが人間と同じ空間で作業する場面は更に増えると予想される。移動ロボットが人間と同じ空間で作業を行う場合、ロボット自身が人間や動物などの自律移動する存在を認識し、それらを回避する動作が必要となる。このような動作を実現するには、ロボットが動作する環境の地図をロボット自身が構築し、動的に更新し続けなければならない。

本稿では、人間の生活空間における移動ロボットの人避けタスクを設定し、人避けに必要な環境地図の表現方法およびその動的な更新手法を提案する。実験では、提案手法を組み込んだ移動ロボットを実際に動作させることで、人回避タスクにおける地図構築のための適切なパラメータを調査する。

2 関連研究

人間の生活空間において移動ロボットが人を追尾・回避するには、周囲の情報を常に収集し、ロボット内部で環境地図を更新し続けなければならない。周囲の情報を収集するにはさまざまなセンサをロボットに搭載する必要がある。移動ロボットが環境地図を構築するためのセンサとして、レーザー式測域センサを用いた研究例が多い[2, 3, 4, 5]。これらの研究では、センサによって収集した点群情報を用いて、周囲の物体の形状再現や自己位置測定の精度改善を試みている。また、ロボットのセンサデバイスとしては、Microsoft社のKinectを用いた研究も盛んである[1, 6]。Kinectを用いることで、深度情報の計測、人骨格の認識機能、動体検知機能を安価に導入することが可能になった。センサデバイスは小型化、低価格化が進んでおり、さまざまなセンサを搭載した家庭用ロボットの登場が予想される。

本研究では、複数のセンサを搭載した移動ロボッ

トを用いて、生活空間においてロボット自身に人を認識させ、人と競合しない自律動作を実現することを目指している。本稿では移動ロボットとしてアイロボット社のルンバを用いる。ルンバ上にレーザー式測域センサと Kinect 互換の動体検知デバイスを搭載し、自律的に環境地図構築および人避けを行うロボットシステムを開発する。

3 人避けタスク

3.1 人避けタスクとは

本稿では、移動ロボットはある目的地点への到達を最終目標とする。ロボットが移動する環境には机、椅子、壁などの障害物が存在する。更に、その空間内で人が歩いて移動し、ロボットの進路上に侵入することを想定する。移動ロボットは周囲の障害物に加えて進路上に侵入する人を回避しなければならない。移動ロボットが人を避けるには、ロボットの近くに人が存在することを認識し、目的地までの経路計画においてその場所を避けた経路を生成する必要がある。さらに、人が移動して移動ロボットの進路上に侵入した場合、ロボットは新たな経路を生成し直す必要がある。

3.2 環境地図構築の必要性

本研究では、人の生活空間でロボットが自律的に動作をすることを目的としている。ロボットを自律的に動作させるには、ロボット自身の信念となる内部モデルを持たせる必要がある。本稿ではこの内部モデルを環境地図と呼ぶ。しかし、人の生活空間は時々刻々と変化してしまうため、移動ロボットが事前に環境地図を与えられていたとしても、ロボット自身のセンサ情報に基づいて地図情報を修正、更新し続ける必要がある。

本研究では複数のセンサを使用し、移動ロボット自身に環境地図を動的に作成、更新させる。動的な地図構築を実現する上で問題となるのは、センサ情

報を統合する手法および不要なデータの削除方法である。

4 提案手法

4.1 数値標高モデルによるセンサデータ統合

本研究では移動ロボット自身がセンサデータに基づいて環境地図を構築する。センサデバイスとしてはレーザー式測域センサと Kinect 互換の動体検知デバイスを想定している。しかし、これらのセンサから得られたデータをそのまま地図情報として格納しようとすると、データ量が膨大になってしまう。そこで、本研究では得られたデータを数値標高モデルを用いて圧縮する。

数値標高モデルとは、地形データをデジタル表現することを目的としたデータ表現方法である。本研究で使用するレーザー式測域センサを例にあげて数値標高モデルの特徴を説明をする。

レーザー式測域センサは、センサから障害物までの距離とその方向をデータとして取得できる(図1)。本研究で使用するレーザー式測域センサは、センサ前方を中心として-120度から120度までの範囲で平面上の物体までの距離を測定できる。得られたデータは3次元空間上の点群として表現され、点群データはロボットの座標系へ変換して使用される。センサは、0.1秒ごとに0.36度刻みで240度の範囲を走査する動作を続ける。そのため、センサが取得する点群の数は膨大なものとなり、それらすべてを格納、処理することは困難となる(図2)。さらに、レーザー式測域センサから得られる点群データに加えて、Kinect 互換デバイスによる動体検知結果を環境地図に統合しなければならない。

本稿では、得られたセンサデータを数値標高モデルによって圧縮する。数値標高モデルでは対象となる空間を平面上のグリッドで表現する。本稿では、図3に示すように対象領域を正方形のグリッドで分割する。センサから得られた情報は各グリッドに対応

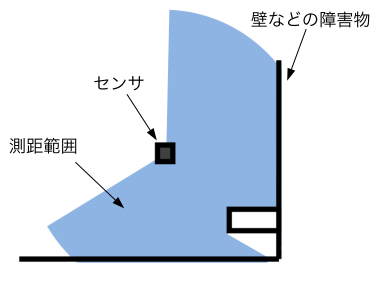


図 1: レーザー式測域センサの測距範囲. 本稿で用いるセンサでは, センサを中心として 240 度の範囲の平面上で物体までの距離を測定できる.

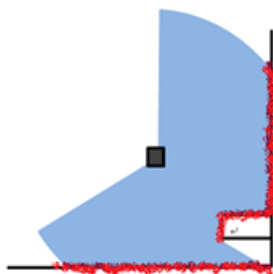


図 2: レーザー式測域センサによって得られる点群データ. 図中の赤色は得られた点データを表す. 1 回の走査で最大 660 個程度の点データを得られる.

付けられて処理される.

本稿で用いる数値標高モデルによる地図は, ロボット座標系で固定する. 座標系の原点はロボットが起動した位置, X 軸正方向はロボット起動時のロボット正面方向とする. 得られたセンサデータの位置情報は, 観測された時点のロボットの自己位置測定情報を用いてロボット座標系へと変換される. そして, その位置座標に対応するグリッドの数値情報が更新される. さらに, ロボットの自己位置測定の誤差とセンサデータの誤差を考慮して, 障害物が検出された周囲のグリッドにも障害物を表す数値情報を書き込む (図 4).

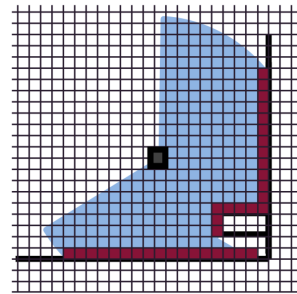


図 3: 対象領域をグリッドで分割した状態. 数値標高モデルでは各グリッドに数値情報を格納することで情報量を圧縮する. レーザー式測域センサで得られた点群データは対応するグリッドごとの数値情報へと変換される.

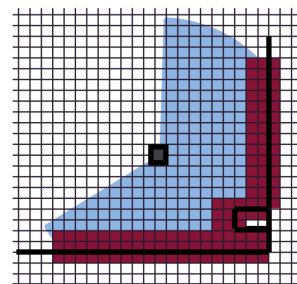


図 4: 誤差を考慮してセンサデータに対応するグリッドの周囲にも障害物を表す数値情報を書き込む.

本稿では, レーザー式測域センサで得られた点群データ, および, Kinect 互換デバイスで検出された動体の位置, の二種類のデータを数値標高モデルの地図上で統合して管理する. ロボットの制御では, 統合地図を参照して経路計画を行う.

4.2 センサデータの座標変換

センサから得られるデータに含まれる位置情報は, センサを基準とした座標系で得られる. この位置情報は移動ロボットの座標系へと変換される必要がある. センサ座標系でのセンサデータの座標値を (x'_s, y'_s) , ロボット座標系でのロボットの位置座標を (x_r, y_r) ,

ロボット座標系でのロボットの向き（センサの向き）を θ_r とすると、ロボット座標系でのセンサデータの座標値 (x_s, y_s) は以下の座標変換で得られる:

$$\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r & x_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r & y_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_s \\ y'_s \\ 1 \end{pmatrix}$$

4.3 センサデータの更新

4.3.1 動体のデータ更新方法

本稿で開発するシステムでは、Kinect 互換デバイスで検出された動体の情報を線形リストで管理する。このリストは検出された動体ごとに新規生成され、その動体の観測情報の履歴を保持する。既知の動体が再検出されるとその位置座標と観測時間の組がリストに追加される (図 5)。検出された物体が既知の物体と同一かどうかの判定は OpenNI¹ が提供している API によって行われる。

リストの長さには最大長を設定しておき、リストが一定以上の長さになった場合は観測情報が古い要素から削除される。また、観測から一定時間以上経過した要素も自動的に削除される。リストが空になればリストそのものが削除される。このように観測情報の履歴を保持しておくことで、ロボット上のセンサが動体を一時的に見失ったとしても、環境地図へ動体の情報を反映することができる。

4.3.2 レーザー式測域センサのデータ更新方法

レーザー式測域センサで得られた点群データに基づいて、各グリッドに対応する点の数を数値情報としてグリッドに格納する。動体がセンサの測距範囲に存在した場合、その物体に対する点データが観測される。しかし、その物体が移動すると、観測された点データは存在しない障害物の情報として残されることになる。本稿ではグリッドに格納された数値情報を減衰させるモデルを導入することでこの問題を解決する。

¹<http://www.openni.org/>

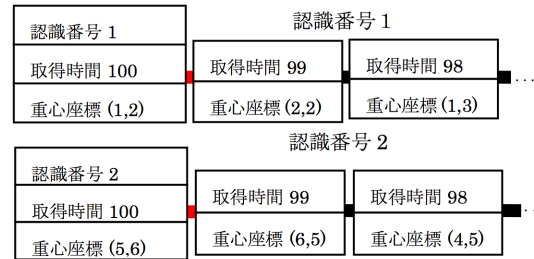


図 5: 線形リストによる動体データの履歴管理。検出された動体ごとにリストを作成し、観測情報の履歴を保持する。

図 6 に減衰モデルの動作例を示す。提案する減衰モデルでは、一定時間ごとにすべてのグリッドが持つ数値を減衰させる。これによって、過去に観測した動体が移動していればその情報は時間が経過するにつれて信頼性が低下し、最終的に地図上から障害物としての情報そのものが消える。ここで、一定時間の減衰量を決定する減衰率のパラメータを導入する。新規に点群データが観測された場合は、過去の数値情報に点の数を足しあわせ、グリッド毎に累積値として保持する。ただし、グリッドが保持する数値情報には最大値を設定する。単位面積当たりで保持する点の数の最大値を設定し、この値に基づいて各グリッドが格納する点の数の最大値が決定される。

5 実験

4 節で述べた地図構築手法を実ロボット上で実装し、以下の二つの調査を目的とした実験を行う:

1. 数値標高モデルで用いるグリッドの適切な大きさ
2. 減衰モデルにおける適切な減衰率

5.1 実験設定

いずれの実験も移動ロボットとしてルンバ研究開発キット²を用いる。ルンバ上に台となるフレームを

²<http://science.irobot-jp.com/>

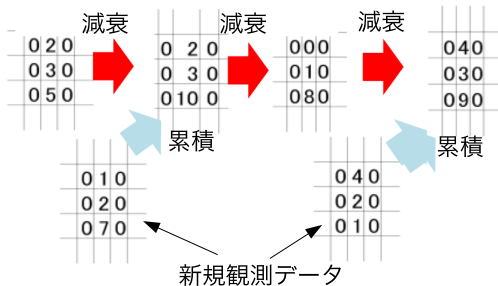


図 6: 点群データによるグリッド情報の更新. 一定時間経過すると各グリッドが持つ数値は減衰される. 新規観測データが得られた場合は, グリッド毎に新規数値を足しあわせる. この例ではグリッドの最大値を 10, 減衰率を 10%としている.

取り付け, 制御用 PC とセンサを設置する. 今回の実験ではデータ収集用 PC と制御用 PC の 2 台の PC を搭載する. データ収集用 PC にはレーザー式測域センサとして北陽電気社製の URG-04LX-UG01 を, Kinect 互換デバイスとして Xtion PRO LIVE を接続する. 制御用 PC とルンバはコミュニケーションケーブルで接続される. データ収集用 PC と制御用 PC との通信は, 実験環境内に設置された無線アクセスポイント経由で行う. 最終的な移動ロボットの外観を図 7 に示す.

移動ロボットはあらかじめ設定された目標位置へ到達するための経路計画を実行し, 生成された経路に従って移動動作を繰り返す. 経路が一度決定されれば, その経路上に障害物が新しく現れない限りその経路に沿った移動を続行する. 経路上に障害物が発見されれば, 経路計画を再度実行する. 経路計画の空間として数値標高モデルのグリッド分割をそのまま用い, 経路計画は A* アルゴリズムで行う. 今回は初期位置から 4m 離れた位置を目標位置とし, ロボットの移動途中で人が経路上に侵入する.

データ更新における各パラメータの設定は次のようにした. 動体の観測情報の履歴を保持するリストの最大長は 10, 動体の観測情報の最大保持時間は 10 秒とする. グリッドが保持する点の数の最大値を決

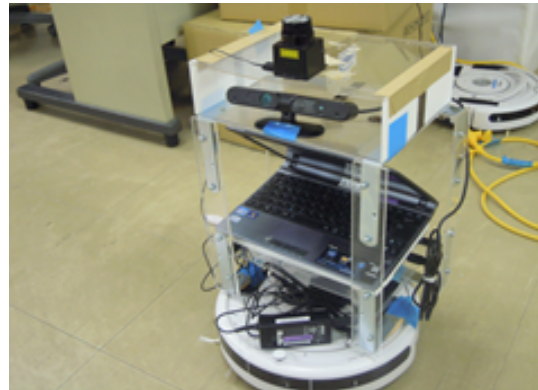


図 7: 移動ロボットの外観. ルンバに台を取り付け, PC2 台とセンサを設置する.

表 1: 実験 1 の結果.

| | 5cm | 10cm | 15cm | 20cm |
|------|-----|------|------|------|
| 1 回目 | 不可 | 55 秒 | 52 秒 | 55 秒 |
| 2 回目 | 不可 | 不可 | 41 秒 | 48 秒 |
| 3 回目 | 不可 | 67 秒 | 44 秒 | 50 秒 |

定するパラメータとして, 10cm^2 あたり 10 個を最大値とする. 動体の情報と点群データのいずれも, データ更新の時間間隔は 1 秒とする.

5.2 実験 1: グリッドの適切な大きさの調査

グリッドの辺の長さを 5cm, 10cm, 15cm, 20cm に変更し, 目標位置までの到達時間をそれぞれ計測した. 実験結果を表 1 に示す. 表から分かるように, グリッドの辺の長さが 15cm の場合にもっとも安定した結果が得られた. 図 8 に生成された環境地図と経路の例を示す.

5.3 実験 2: 適切な減衰率の調査

グリッドが保持する点の数を減衰させる割合を 0%, 30%, 50%, 100% に変更し, 目標位置までの到達時

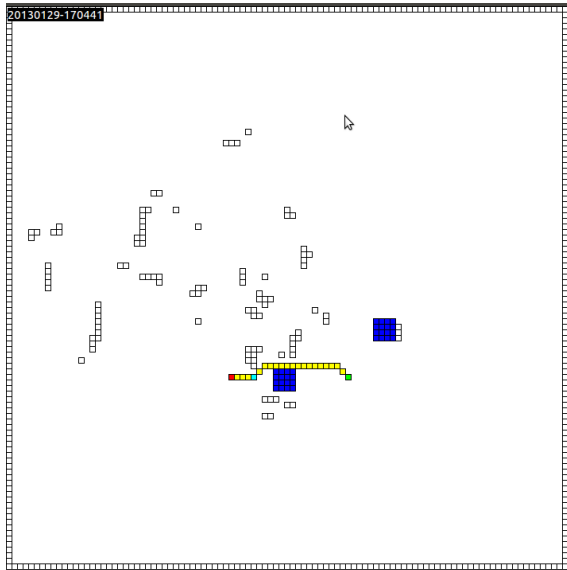


図 8: グリッドの辺の長さが 15cm の場合に生成された環境地図と経路の例. 赤色はロボットの現在位置, 青色は動体の位置, 黒枠に灰色は障害物, 黄色は生成された経路を表す.

表 2: 実験 2 の結果.

| | 0% | 30% | 50% | 100% |
|------|------|------|------|------|
| 1 回目 | 65 秒 | 52 秒 | 67 秒 | 60 秒 |
| 2 回目 | 不可 | 41 秒 | 57 秒 | 60 秒 |
| 3 回目 | 不可 | 43 秒 | 55 秒 | 65 秒 |

間をそれぞれ計測した. グリッドの辺の長さは 15cm とし, その他の設定は実験 1 と同じとする. 各グリッドが保持できる点の数の最大値は 23 となる. 実験結果を表 2 に示す. この結果から, 減衰させる割合は 30%程度が妥当であると考えられる.

6 まとめ

本稿では移動ロボットによる人避けタスクを設定し, これを解決するために数値標高モデルをベースとした環境地図構築手法を提案した. 実験では, 数

値標高モデルにおける適切なグリッドの大きさの調査, および, 導入した減衰モデルにおける適切な減衰率の調査を行った. 今後の課題として, ロボット本体の制御プログラムの安定性向上, より多様なセンサデータへの対応, 動体の移動予測, などが挙げられる.

参考文献

- [1] Piyush Khandelwal, Peter Stone: A Low Cost Ground Truth Detection System for RoboCup Using the Kinect, Proc. of the RoboCup International Symposium 2011 (2011).
- [2] Genya Ishigami, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida: Path Planning for Planetary Exploration Rovers and Its Evaluation based on Wheel Slip Dynamics, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007), pp. 2361–2366 (2007).
- [3] 古川奈々恵, 五島美沙, 三田彰: レーザーレンジファインダ搭載ロボットを用いた日常生活における動線把握, 社団法人日本建築学会 学術講演梗概集. A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術 2011, pp. 537–538 (2011)
- [4] 大野和則, 永谷圭司, 秋山英久: レスキューロボットの地図構築, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp. 169–172 (2010).
- [5] 奥迫伸一, 坂根茂幸: レーザレンジファインダを用いた移動ロボットによる人の追跡, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.5, pp. 605–613 (2006).
- [6] 吉田聡, 泉正夫, 辻洋: 人物判定における Kinect の骨格線情報の利用, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.8, pp. 123–126 (2012).