

病院内自律搬送ロボットの3次元環境認識・障害物回避技術

Recognition of 3D Dynamic Environments and Obstacle Avoidance for In-Hospital Autonomous Delivery Robot

村井 亮介
Ryosuke Murai

酒井 龍雄
Tatsuo Sakai

川野 肇
Hajime Kawano

木下 慎太郎
Shintaro Kinoshita

上松 弘幸
Hiroyuki Uematsu

北野 幸彦
Yukihiko Kitano

要 旨

自律移動ロボットが、オーバーハングのある物体や移動体などの障害物を回避しながら継続して移動するためには、周囲の動的環境を3次元で認識する必要がある。しかし、移動ロボットに搭載可能な実用的な3次元センサは少ない。一方、2次元センサの時系列データから3次元地図を生成する方法が多く研究されているが、従来手法では動的環境をリアルタイムに把握できない問題がある。そこで、移動ロボットに2次元センサのレーザーレーダを複数台搭載し、これらセンサで取得した時系列データを選択的に記憶・忘却することで、3次元情報を含む障害物回避地図をリアルタイムに生成・更新する技術を開発した。この情報を用いることで、移動ロボットは、オーバーハングのある静止障害物に対する確実な回避動作や、移動障害物に対するスムーズな回避動作を実現できる。病院内搬送ロボット“HOSPI”に本技術を搭載し、実用化した。

Abstract

Autonomous mobile robots need to recognize its surrounding environment as three-dimensional on a real-time basis in order to achieve continuous movement while avoiding obstacles such as moving objects or objects with overhang parts. Appropriate and practical 3D sensors are not available, and the method of generating a three-dimensional map from the time series data obtained from a two-dimensional sensor cannot get the information on a real-time basis. We have developed map creation technology for obstacle avoidance that features selective memory intake and release of obstacle positions based on positional relationship between the obstacles on real-time basis. By using this method, a robot can avoid obstacles with overhang parts and move smoothly through moving obstacles. We installed this method on the in-hospital transportation robot “HOSPI” and put it into practical use.

1. はじめに

病院内には、ベッドや車いすなど3次元的に起伏が多く、移動ロボットにとって移動の障害となるものが多数存在する。また、多くの病院スタッフや患者さまが通路を歩き回っている。このような環境において、移動ロボットがこれらの人や障害物を回避して目的地点へ到達するためには、周囲の動的環境を3次元で認識する必要がある。特に、狭い通路などで、壁や人などに接近して移動する場合や、オーバーハング部を有する障害物の付近を移動する場合、移動ロボットは周囲の3次元環境をより正確に、かつリアルタイムに把握する必要がある。これまで、2次元平面内の障害物までの距離を計測するセンサであるレーザーレンジファインダ (Laser Range Finder: 以下LRFと記す) を用い、人や障害物の存在する中、これらを避けながら移動するアルゴリズムが多数研究されている[1]。起伏の多い障害物が環境内に少ない場合、LRFで特定の水平面のみを計測し、その結果に基づいて移動するアルゴリズムで十分である。例えば、筆者らは、血液検査を行う工程において、LRFを1台搭載した移動ロボットを複数台用いた搬送システムを導入している[2][3]。しかし、病院内を移動ロボットが移動する場合、

LRFで特定の水平面のみを計測する手法では、オーバーハング部に衝突する可能性がある。一方、この課題に対処するため、3次元センサを移動ロボットに搭載する方法が研究されている[4][5]。これら3次元センサには、赤外光を用いた距離画像カメラや、パターン光を投影してカメラでその光を観測することで3次元情報を得るセンサがある。しかし、これらのセンサは、LRFを用いる方法に比べてFalse Positive (誤検出) とFalse Negative (見逃し) が多く、False Positiveの場合、移動ロボットは障害物がないにもかかわらず不必要に停止する可能性があり、False Negativeの場合、障害物に衝突する可能性がある[6][7]。そのため、病院内で日々搬送業務を行う移動ロボットに対してこれらの3次元センサを搭載することは困難である。これに対して、LRFを用いた3次元環境認識技術が多く研究されている[8][9]。例えば、LRFで取得した時系列データをSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の技術を用いて蓄積し、3次元地図を得る研究がある。しかし、これら研究例は、静的な3次元地図を生成することを目的としており、動的環境に言及しているものは少ない。また、移動障害物の存在下での地図生成を実現している研究例においても、その例はリアルタイム性に欠ける問題がある[10]。リアルタイムに障

害物位置を把握できないことにより、障害物とのスムーズなすれ違いができない、あるいは、障害物の急な飛び出しなどに対応できないといった問題がある。

そこでわれわれは、移動ロボットにLRFを複数台搭載し、これらセンサで取得した時系列データを選択的に記憶・忘却することで、3次元情報を含む障害物回避用地図をリアルタイムに生成・更新する技術を開発した。この情報を用いることで、オーバーハングのある静止障害物の確実な回避動作や、移動障害物に対して停滞することのない回避動作を実現できる。本稿では、この手法を搭載して実用化した病院内搬送ロボット“HOSPI^(注)”について述べる。

2. HOSPIの概要

HOSPIは、病院内で搬送などの業務を行う自律移動ロボットである。本論文で説明する技術を搭載したHOSPIは、松下記念病院において2011年1月より病院内の薬剤搬送業務を行っている。HOSPIは、病院スタッフにより目的地を指示されると、あらかじめ記憶した地図情報に基づいて走行経路を決定し、目的地に向かう。途中、人や車いすなどに遭遇しても、センサの検知結果に基づき回避動作をしながら目的地へ移動する。HOSPIは、常にHOSPIの運行を監視する管理端末と通信を行う。管理端末が自動ドアやエレベータと通信してこれらを制御することにより、HOSPIは自動ドアの通過、エレベータへの搭乗が可能となる。以下に、HOSPIの構成と仕様、障害物の検知・回避技術について述べる。

2.1 構成と仕様

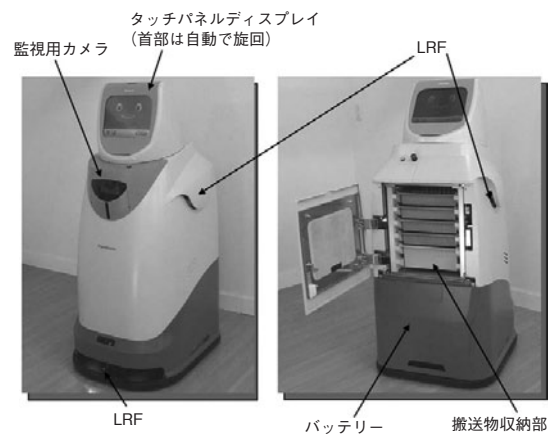
HOSPIの主な仕様を第1表に、概観を第1図に示す。周囲環境を認識するために、HOSPI前方の水平面を計測するLRFを1台、ロボット側方の左右に上方から下方を計測するようにLRFを2台、ロボット前方にも上方から下方を計測するようにLRFを1台配置している。以下では、

第1表 HOSPIの仕様

Table 1 Specification of HOSPI

| | |
|--------|-----------------------------|
| サイズ | 600 (W)×725 (D)×1345 (H) mm |
| 重量 | 120 kg |
| 可搬重量 | 20 kg |
| 最高速度 | 1.0 m/s |
| 搬送時間 | 7時間以上 |
| 駆動方式 | 独立2輪制御 |
| その他駆動部 | 首部旋回1軸 |

(注) 当社の商標



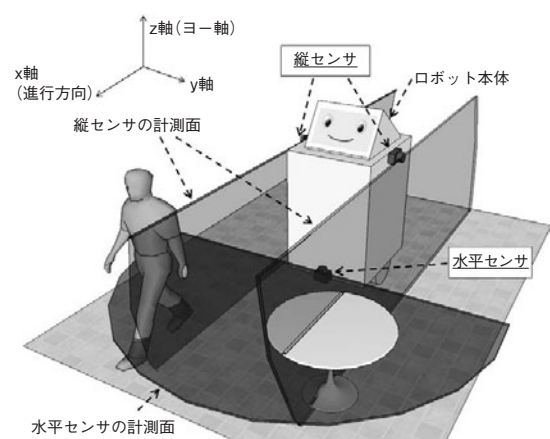
第1図 HOSPIの外観

Fig. 1 Appearance of mobile robot HOSPI

説明の簡素化のため、前方の上方に配置しているセンサは除外して説明を行う。

2.2 障害物の検知

上記センサ配置における障害物検知の様子を、第2図に示す。第2図では、移動体の例として、人をオーバーハング部の存在する障害物の例としてテーブルを検知している様子を示している。第2図に示すように、以下、水平面を計測するセンサを水平センサ、HOSPIの側方に取り付けたセンサを縦センサと称して説明を行う。水平センサは、床面より約100 mmの高さの水平面を、HOSPI前方の $\pm 90^\circ$ の範囲で計測する。縦センサは、HOSPIの外側を計測できるように、センサを約 10° 傾けて取り付け、HOSPIの前方、側方、後方の障害物および段差を検知する。縦センサで計測した距離データは、座標変換により3次元位置に変換し、床面より上方に存在



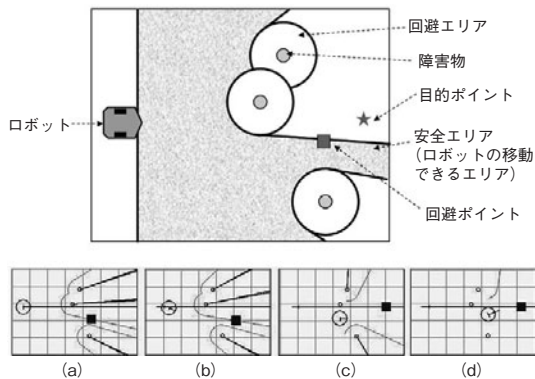
第2図 センサ配置と計測面

Fig. 2 Sensor arrangement and measurement

するデータは障害物、床面より下方に存在するデータは段差として認識する。

2.3 障害物回避

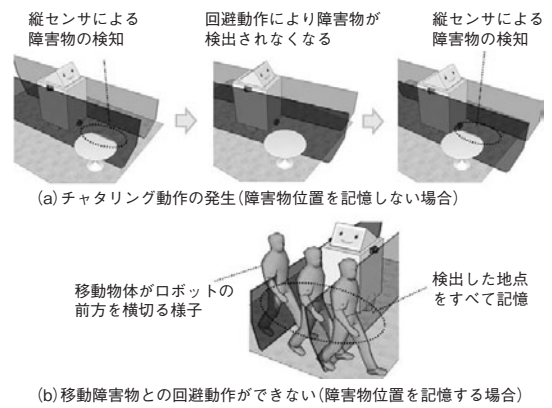
HOSPIは、進行方向に障害物を検出した場合、その障害物を回避して移動する。HOSPIは、認識した障害物の位置情報に基づいて、障害物を回避するための迂回（うかい）点を逐次生成し、その地点へ向かって移動することで障害物を回避する。障害物回避の流れを、第3図を用いて説明する。第3図上部の図は、HOSPI前方に障害物を配置したときの模式図である。HOSPIが目的ポイントに向かって移動中に、その前方に障害物を検出した場合、その障害物の周囲一定範囲に回避エリアを設定する。そして、回避エリアを除くHOSPIの移動できるエリアに回避ポイントを生成する。その後、目的ポイントとHOSPIの間に回避エリアがなくなるまで、HOSPIはこの回避ポイントへ向かって移動することで障害物を回避する。この様子を実機の動作で示した図を（a）～（d）に示す。



第3図 障害物回避方法
Fig. 3 Method of avoiding obstacles

3. 周囲3次元環境認識技術

2次元平面を計測するLRFにより取得したセンサデータを用いてHOSPI周囲の3次元環境を認識するためには、その時系列データを記憶する必要がある。HOSPIのセンサ構成において、上記記憶の仕組みなしで制御を行う方法では、第4図（a）のようにチャタリング動作が発生する。これは、障害物のオーバーハング部は縦センサによってしか取得することができず、縦センサの計測平面はロボットの位置・姿勢の変化に伴い変化することから、障害物を継続して検知することができないことにより引き起こされる。一方、取得した時系列データを単にすべて

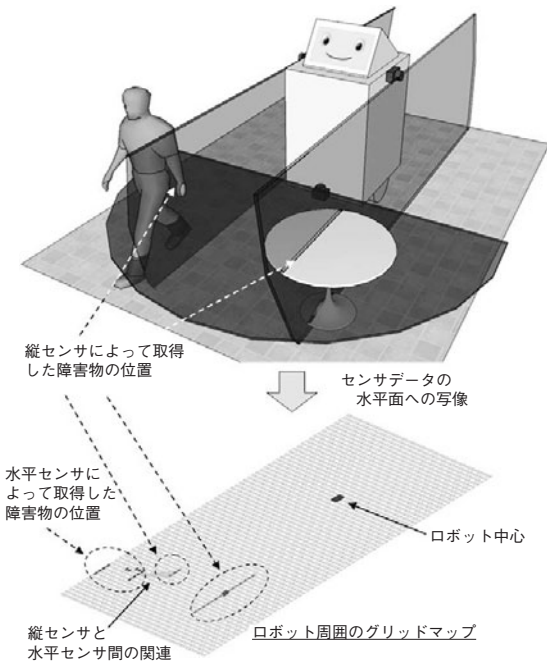


第4図 回避動作時の問題点
Fig. 4 Problems when avoiding obstacles

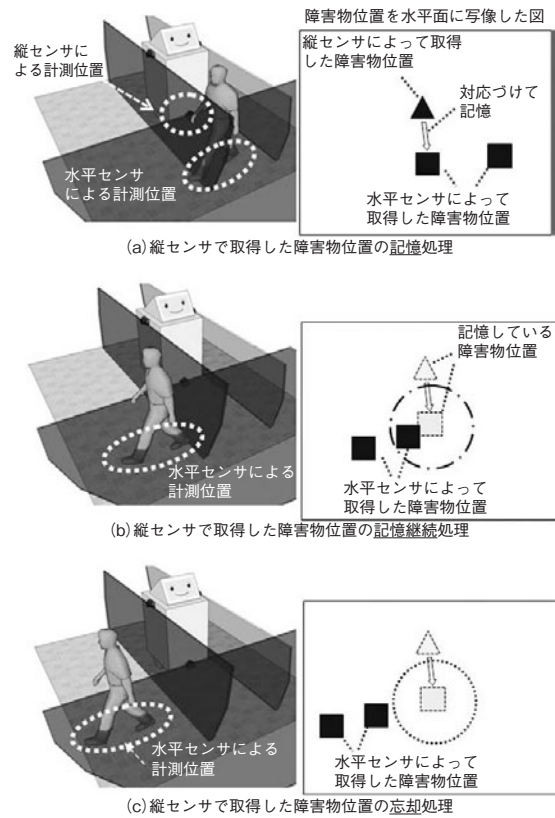
記憶する手法では、第4図（b）に示すように、実際には障害物の存在しない地点にも障害物があると認識することから、ほかの移動体とのスムーズなすれ違い動作ができなくなる。そのため、オーバーハング部のある障害物を確実に回避し、ほかの移動体に対して停滞することなくすれ違い移動を行うためには、障害物位置の適切な記憶・忘却が必要である。以下、障害物位置の選択的記憶・忘却を特徴とするセンサデータフュージョンについて、そのアルゴリズムについて述べる。

3.1 障害物の選択的記憶・忘却アルゴリズム

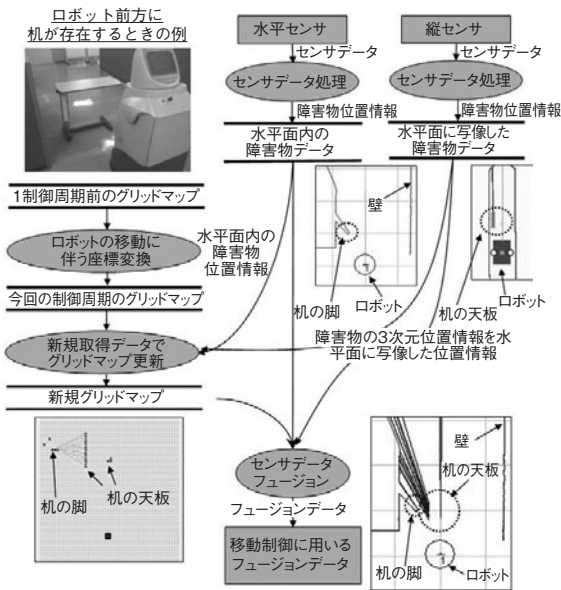
水平センサは、計測物体が移動しても継続して障害物の位置を認識できることに着目し、水平センサでリアルタイムに取得する障害物位置を用いて、記憶した障害物位置から、移動物体に関するデータのみを消去するアルゴリズムを考案した。アルゴリズムの概略を、第5図を用いて説明する。縦センサによって取得した障害物の位置は水平面に写像し、最近傍の水平センサによって取得した障害物位置とセットで記憶する。その後、この記憶している水平センサの障害物位置の付近に水平センサで障害物が検知できる場合は記憶を継続し、障害物が検知されなくなった場合に、記憶している縦センサで取得した障害物位置を忘却する。記憶する情報は、制御周期ごとの全データを記憶すると膨大な量となる。そのため、グリッド状の地図を用いることで、メモリ使用量を一定以内に抑制する。グリッドマップの保有方法としては、ロボットを中心とするロボット座標を用い、HOSPIの移動につれ座標変換などを行いグリッドマップの情報を制御周期ごとに更新する。各グリッドは、障害物有無の情報を持ち、障害物が存在するグリッドは、さらに、障害物の座標、記憶時間、関連させて記憶している水平センサの記憶位置などを情報として保有する。以下、第6図を



第5図 記憶・忘却アルゴリズム概要
Fig. 5 Outline of memory intake and release



第7図 記憶・忘却アルゴリズム
Fig. 7 Method of memory intake and release



第6図 センサデータのフローダイアグラム
Fig. 6 Data flow diagram of sensor data

用いて処理の流れを、第7図を用いて障害物位置の記憶方法、記憶の保持条件、忘却条件について詳述する。

3.2 センサデータ処理の流れ

センサデータ処理の流れを、第6図を用いて説明する。水平センサ、縦センサで取得したデータは、制御周期ごと、座標変換などにより3次元障害物位置情報に変換する。そしてこれらの障害物位置情報と、HOSPIの移動に伴い変換されたグリッドマップの情報を用いて、記憶・忘却アルゴリズムを用いてグリッドマップを更新する。そして更新されたグリッドマップと、水平センサ、縦センサで取得したリアルタイムの障害物位置情報を統合し、回避動作に用いるフュージョンデータを生成する。

3.3 障害物位置の記憶

縦センサによって取得した障害物位置の記憶方法を、移動体として人を検知したときを例に、第7図 (a) を参照して説明する。左の図は障害物を検出したときの俯瞰図 (ふかんず) を示している。右図はこれを水平面へ写像したときの位置関係を示している。障害物位置の記憶は、2次元平面へ写像した座標で記憶する。縦センサによって検知した障害物位置 (▲: 図中の人の手) は、水平センサによって取得した障害物位置の内最短のもの (■: 図中の人の足) とセットで記憶する。その関連を

示したのが図中の矢印 (⇒) である。この距離が一定以上である場合には、この状況では、HOSPIは、これら■と▲の両方の位置情報を用いて回避ポイントを生成して回避動作を行う。

3.4 障害物位置の記憶の保持条件

記憶している縦センサの位置情報の記憶の継続の条件を、第7図 (b) を参照して説明する。第7図 (b) は、第7図 (a) の状態よりも人が少し移動した状態である。このときの縦センサ、水平センサで取得した障害物位置の様子を、第7図 (b) の右図に示す。この状況では、記憶している縦センサの障害物位置 (△) に対応づけて記憶している水平センサの障害物位置 (□) の一定範囲内に、新たに水平センサで取得した障害物 (■) が存在している。この状態は、記憶している障害物位置の付近にまだ障害物が存在していることを意味するため、記憶の継続を行う。そのため、この状況では、記憶している障害物位置 (△) と、新たに取得した障害物位置 (■) を用いて回避ポイントを生成して回避動作を行う。

3.5 記憶した障害物位置の忘却条件

次に、障害物位置の忘却条件を、時間経過により第7図 (c) となったときの状況を参照して説明する。この状況では、記憶している縦センサの障害物位置 (△) に対応づけて記憶している水平センサの障害物位置 (□) の一定範囲内に、新たに水平センサで取得した障害物位置が存在しない。つまり、記憶している障害物位置付近にはすでに障害物は存在しないことを意味する。そこで、移動体が移動したと判断し、記憶している障害物位置を忘却する。そのため、この状況では、新たに取得した障害物位置 (■) のみを用いて回避ポイントを生成して回避動作を行う。これにより、移動体が移動したあとの地点の記憶している障害物位置を忘却し、移動体とのスムーズな回避動作が可能となる。

4. 実験および実証運用

上記アルゴリズムをHOSPIに適用し、オーバーハング部のある静止物体の回避動作と、人とのすれ違い動作を、第2表の実験パラメータのもとで行った。結果を以下に示す。

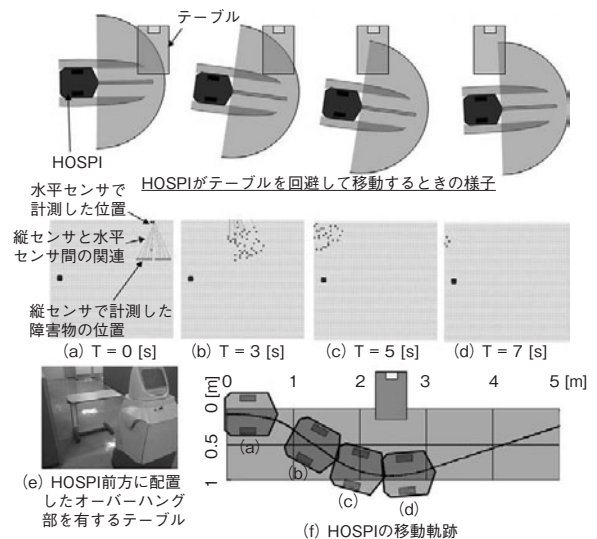
第2表 実験パラメータ

Table 2 Experimental parameter

| グリッドマップの大きさ | |
|-------------------|---------|
| X軸方向 (ロボット中心から前方) | 2100 mm |
| X軸方向 (ロボット中心から後方) | 600 mm |
| Y軸方向 | 1500 mm |
| 各グリッドサイズ | |
| 対応づけて記憶する距離の最大 | 300 mm |
| 障害物位置の記憶時間 | 10 s |
| グリッドマップ更新周期 | 40 ms |

4.1 静止障害物との回避

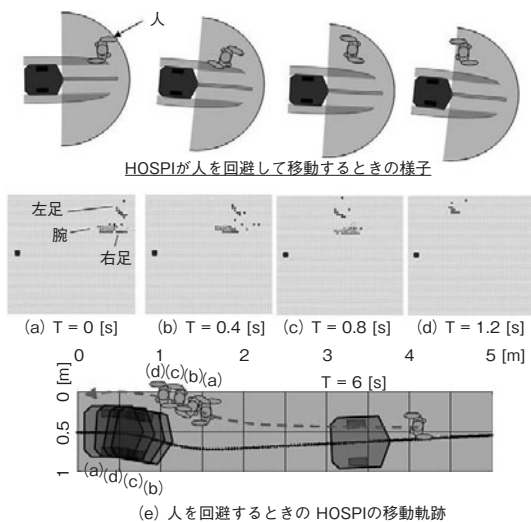
第8図 (e) に示すように、HOSPIの前方にオーバーハング部の存在するテーブルを経路上に配置した。このときのHOSPIの移動軌跡を第8図 (f) に、移動する間のセンサの検出範囲とテーブルの位置関係を示した図を、第8図の最上部に示す。HOSPIはテーブルに衝突することなく、またチャタリング動作を起こすことなく、回避しながら移動している様子がわかる。このときのグリッドマップの情報を、第8図 (a) ~ (d) に示す。これらの図より、HOSPIはオーバーハング部を継続して記憶し、記憶した障害物位置情報に基づいて回避動作をしている様子がわかる。このとき、HOSPIは0.6 m/sほどの速度を維持して移動している。障害物の位置を記憶しない従来例では、オーバーハングのある障害物に対する回避動作ではチャタリング動作を引き起こしてしまうことから、本手法がオーバーハング部のある障害物の回避動作に有効であることを示している。



第8図 オーバーハングの存在する障害物の回避動作
Fig. 8 Result of avoiding obstacle with overhang part

4.2 移動障害物との回避

第9図最上部はHOSPIが図中を右方向に移動中に、右側から左側に向かって人が移動し、HOSPIが人を回避しながら移動する様子を示している。ここでは、人およびHOSPIの両者が互いに回避しながら移動する様子を示している。人はおよそ0.5 m/sの移動速度で移動している。このときの、HOSPIの移動軌跡を第9図(e)に示す。HOSPIは人にぶつかることなく、かつ停滞することなくすれ違い移動を実現している。また、このときのグリッドマップの情報を、第9図(a)～(d)に示す。これらの図から、HOSPIは、人が移動した跡の位置には障害物位置を記憶していないことを示している。このとき、HOSPIは0.6 m/s程度の速度を維持して移動している。障害物の位置を単に記憶するだけの方法や、SLAMを用いて3次元地図を生成する従来法であれば、いったん検出した人の位置を一定時間継続して記憶するため、人の移動してきた軌跡を避けて大きな回避動作を行う、あるいは、回避できるポイントが見つからず、停止してしまうといった問題がある。これに対して、本手法では停滞することなくスムーズに移動していることから、本手法が、移動体とのすれ違いに有効であることを示している。



第9図 人とのすれ違い動作の様子

Fig. 9 Result of avoiding human when he/she approaches from front toward robot and passes its side

5. まとめ

LRFを複数搭載した自律移動ロボットにおいて、センサデータの選択的記憶・忘却を特徴とするセンサデータフュージョンにより、オーバーハング部のある障害物の確実な回避動作と、移動体に対しても停滞することのな

いすれ違い動作を実現した。

本手法を搭載した自律移動ロボット“HOSPI”を、病院内の薬剤や検体を搬送する院内搬送ロボットとして実用化した。実稼動においてHOSPIは、多くの人やベッド、車いすが行きかう中を走行し、これらに衝突することなく日々の搬送業務を行っている。

今後は、日々進化する環境認識センサの技術動向を見極め、低コスト化と安全性向上を図り、移動ロボットのさらなる実用化を進める。

本ロボットシステムの開発段階や日々の運用において、医療現場からの貴重なご意見を頂戴しました松下記念病院の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] J. G. Kang, “Laser scanner based obstacle avoidance algorithm for autonomous service robots,” SCIS & ISIS, pp.2062-2066, 2008.
- [2] 村井亮介 他, “自律移動ロボット群による搬送システムの実用化,” 日本ロボット学会誌, vol.28, no.03, pp.71-78, 2010.
- [3] R. Murai et al., “Conveyance system using autonomous mobile robots,” Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), pp.54-59, 2009.
- [4] F. Yuan A. et al., “Laser-based navigation enhanced with 3D time-of-flight data,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2009.
- [5] Correa D.S.O. et al., “Mobile robots navigation in indoor environments using kinect sensor,” Critical Embedded Systems (CBSEC), pp.36-41, 2012.
- [6] T. Stoyanov et al., “Comparative evaluation of range sensor accuracy for indoor mobile robotics and automated logistics applications,” Robotics and Autonomous Systems, Special Issue on the 5th European Conference on Mobile Robots, 2012.
- [7] T. Stoyanov et al., “Comparative evaluation of range sensor accuracy in indoor environments,” Proceedings of the 5th European Conference on Mobile Robots, pp.19-24, 2011.
- [8] S. Thrun et al., “A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.321-328, 2000.
- [9] 油田信一 他, “使い易い三次元測域センサのインタフェースを目指して,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-L01, 2007.
- [10] D. Holz et al., “Continuous 3D sensing for navigation and SLAM in cluttered and dynamic environments,” Information Fusion, 11th International Conference, 2008.

執筆者紹介



村井 亮介 Ryosuke Murai
 パナソニック ヘルスケア株式会社
 院内ロボットストラテジックビジネスユニット
 Hospital Robot Strategic Business Unit,
 Panasonic Healthcare Co., Ltd.



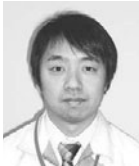
酒井 龍雄 Tatsuo Sakai
 パナソニック ヘルスケア株式会社
 院内ロボットストラテジックビジネスユニット
 Hospital Robot Strategic Business Unit,
 Panasonic Healthcare Co., Ltd.



川野 肇 Hajime Kawano
 モノづくり本部 生産技術開発センター
 ロボット技術開発グループ
 Robot Development Group, Production
 Engineering Development Center, Global
 Manufacturing Div.



木下 慎太郎 Shintaro Kinoshita
 パナソニック ヘルスケア株式会社
 院内ロボットストラテジックビジネスユニット
 Hospital Robot Strategic Business Unit,
 Panasonic Healthcare Co., Ltd.



上松 弘幸 Hiroyuki Uematsu
 パナソニック ヘルスケア株式会社
 院内ロボットストラテジックビジネスユニット
 Hospital Robot Strategic Business Unit,
 Panasonic Healthcare Co., Ltd.



北野 幸彦 Yukihiko Kitano
 パナソニック ヘルスケア株式会社
 院内ロボットストラテジックビジネスユニット
 Hospital Robot Strategic Business Unit,
 Panasonic Healthcare Co., Ltd.