

博士論文 (要約)

物体配置が変化する非水平床面環境における
移動ロボットの持続的環境認識

Continuous Environment Recognition for Mobile Robot in
Environment with Dynamic Object Layout on Non-Horizontal Floor

木村 宣隆

Nobutaka KIMURA

本論文は、屋内自律移動ロボットを対象に、周囲物体配置が時々刻々変化し、床面上に非水平箇所を有する環境にて正常動作する環境認識技術を提案するものである。

無人搬送車(automated guided vehicle, AGV)などのロボットが目的地に向かって自律的に移動するためには、ロボットが自身の位置(及び姿勢)を把握し、与えられたルートに沿って走行していることを確認する必要がある。従来は、床に埋設された磁気軌道などの走行ガイドを必要としていたが、近年は、周囲環境を認識しそれらの走行ガイドを不要化する技術を搭載したロボットの実用化事例がいくつか報告されている。

実用化済みの環境認識技術は、水平面上に存在する周囲物体の分布を計測する2Dレンジファインダを使用したものが多い。計測された周囲物体の分布と予め与えられた周囲環境地図とを照合することで、周囲環境内における自己位置を推定し、地図に記載されていない未知物体を障害物候補として検出することができる。ここで、この環境認識には環境内の形状を表す地図が必要となるが、これを事前準備するための技術は、静的環境を対象に自己位置推定と同時に地図を作成する問題(simultaneous localization and mapping, SLAM)の解法として開発されている。これらの技術は1990年代から盛んに研究がなされている。

ただし、従来の2Dレンジファインダベース環境認識技術は、その適用環境に関し、周囲物体の配置が変化しない静的な環境であること、床面が水平であること、という前提条件を必要としている。工場、倉庫、オフィス、家庭などでの運用を想定すると、この前提に当てはまらない状況が多く発生する。例えば、工場や倉庫においては配置が時々刻々変化する荷物などが数多く存在し、それらに囲まれると地図と計測結果との間に大きな差異が生じ、自己位置推定が困難になる。また、オフィスや家庭においては段差やスロープを通る場面も頻繁に発生するが、下り坂ではセンサが下方に傾き床面を計測してしまい、それを未知物体として誤検出してしまう。

以上のような運用上の制約が、適用可能なアプリケーションを限定してしまい、この環境認識技術が搬送作業を主とした「移動」のロボット化を牽引する技術に至っていない要因の一つとなっている。この前提条件を緩和し適用環境の拡大を実現するためには、ロボットの環境認識について、従来研究で達成されていない以下の3点の技術的課題を解決する必要がある。

- ・ 地図の歪みの発生を抑制しつつ環境地図をリアルタイムに更新し続けること。
- ・ 演算コストやセンサ構成価格を抑えつつ3D自己位置推定を継続すること。
- ・ センサを移動させながら環境内を連続的に計測し2.5D地図を作成すること。

そこで、本研究では、「周囲物体配置が時々刻々変化し、床面上に非水平箇所を有する環境にて正常動作する環境認識技術を確立すること」を目的とする。さらに、ロボットを普及させるという観点から、「実用化済み環境認識技術に対しコストの増加を抑え、なおかつ、同等の持続性を有する技術として開発すること」を基本方針とする。

これらの要求事項を満たすため、本研究では、以下の3つの技術を提案、開発した。

(1) リアルタイム地図更新技術

周囲物体配置が時々刻々変化する環境では、環境地図と実環境との差異を小さく保つため、地図をリアルタイムに更新していくことが求められる。しかし、単純に地図を更新する従来手法では、各フレームの更新誤差が蓄積していき、動くはずのない固定された壁が地図上で少しずつ移動し、地図が歪む現象が発生してしまう。そこで、本研究では、周囲物体を空間に固定される静止物体と荷物など移動する可能性のある準静止物体とに自動分類し、認識された静止物体の周辺を地図更新しないエリアに設定することで、この現象を回避するリアルタイム更新手法を提案した。

ここで、リアルタイム性を確保するためには、物体が存在しないエリアの観測結果が一定数となるようにサンプリングする必要があるが、それにより各エリアの観測とそれによる地図の更新が不定期となってしまう。本手法では、新しい観測と前回の観測の結果が同一のとき、その間は観測された状態が継続していたとみなすことにより、安定した地図更新を実現した。

(2) 3Dジャイロセンサと床面高さ地図を用いた3D解析技術

床面上に非水平箇所を有する環境では、演算コストとセンサ構成価格の増加を抑えながら3次元的に環境認識を行う必要がある。従来手法では、演算量の削減のため3Dジャイロセンサを併用するが、メモリ使用量の削減が課題となっている。そこで、本研究では、環境内の床面高さの分布を2次元的に記載した床面高さ地図を追加導入し、これらの地図を3次元情報に展開することなく、レンジファインダの計測結果と照合可能な手法を確立し、メモリ使用量の削減を実現した。

ここで、計測距離に応じて床面計測の誤差は変化することから、未知物体か床面かを正しく判定するためにはその誤差を正しく見積もる必要がある。本手法では、床面計測の簡易モデルを用いて床面計測誤差の標準偏差と計測距離との関係を理論的に導出することで、状況に応じて床面と未知物体とを判別する閾値を適切に設定することを可能にした。また、3D姿勢角の推定では、ジャイロセンサのみならず床面高さ地図を用いる推定手法も併用することで、ジャイロセンサの誤差蓄積の抑制を試みた。

(3) 床面計測用センサを搭載した専用ロボットによる2.5D地図作成技術

非水平床面に対応する(2)の技術を用いるに当たり、2D環境地図と座標系が一致した床面高さ地図を現実的なセンサ構成価格及び作業コストで準備する必要がある。そのため、本研究では、床面計測用のレンジファインダを搭載したロボットを用い、(2)の技術を地図作成の問題へと応用し、ロボットに床面上の非水平箇所を通りつつ環境内を移動させるのみで地図を作成可能とすることを目指す。ただし、センサの計測誤差が大きい場合、床面高さ地図に実際には存在しない微小な凹凸を発生させてしまう。そこで、本研究では、予め計測した水平床面高さを事前情報として用い、その高さ付近の被計測点を水平床面の計測結果であるとみなし矯正する2.5D地図作成手法を確立した。

続いて、シミュレーションや実機実験によりその有効性を確認した。

まず、物体配置変化に対応する(1)の技術を検証すべく、30m×30mの倉庫を模擬したシミュレーションを実施した。その倉庫内には、1m×1mの荷物の設置位置を96箇所設け、1回/分の頻度でその位置の荷物が出現(搬入)と消去(搬出)を繰り返すこととした。ここで、搬入の際には荷物は位置ずれを有して設置させている。この倉庫内を、約280分掛けてロボットが環境認識を行いながら50周走行する。この環境認識において、単純な地図更新と、静止物体と準静止物体とを判別し静止物体周辺の地図更新を停止する提案手法とを比較した。ここで、静止物体と準静止物体との判別するための観測時間は、環境変化の周期(1分)の10倍とした。

その結果、地図更新で生じる地図の歪みを従来の17cmから1cm以内へと、自己位置推定誤差を従来の平均9.3cmから平均0.8cmへとそれぞれ抑制することに成功した。これらの誤差は増大する傾向が見られず、50周以降もこの精度を持続可能であることが期待できる。

続いて、非水平床面に対応する(2)の技術を検証すべく、傾斜角12度の小スロープで繋がった高低差7cmのフロア間の移動、高さ2cmの凸部(ケーブルカバー)のあるフロア内の移動をそれぞれ対象とした実験を実施した。ロボットには、2Dレンジファインダに加え、その1/10程度の価格であるジャイロセンサを搭載した。小スロープを下る実験により、床面と未知物体との判別性能、3Dジャイロセンサの誤差蓄積の抑制効果を検証する。続いて、二つの実験から、床面と未知物体との判別における閾値調整の効果を検証する。

実験の結果、小スロープを下る際に、センサの傾きが6度以下のとき、2.5mの距離にある未知物体の検出に成功した。小スロープを通るフロア間を5往復した際には、

2 往復目以降の下りで発生する未知物体の誤検知を、従来の 253 回中 64 回から 3 回に抑えることに成功した。ピッチ角の誤差や誤検知の回数に徐々に増えていく傾向はみられず、5 往復以降もこの性能を持続可能であることが期待できる。また、床面と未知物体との判別において、閾値を固定値とする場合は、小さく設定するとセンサから遠い距離の床面を未知物体と誤検知し、逆に大きく設定すると近い距離の未知物体を床面とみなしてしまった。これに対し、本手法は、距離に応じて閾値を変化させることで、床面と未知物体との分離を適切に行うことに成功した。

(1) (2) の技術は組み合わせて 1 つの環境認識技術とし、ロボットに搭載することができる。その場合においても演算時間を 100 ミリ秒以内に抑えられており、実用化に向けて十分なリアルタイム性を有していることを確認した。

さらに、(3) の 2.5D 地図作成技術を検証すべく、高低差 7cm、傾斜角 12 度の小スロープで二つのフロアが繋がっている屋内環境を対象とした実験を行った。(2) の技術の検証の際に使用したロボットに対し、床面を計測する 2D レンジファインダを追加搭載し、小スロープ上を走行しながら周囲環境を計測させる。得られた計測結果から 2.5D 地図を作成し、その地図を用いた (2) の技術が正常に動作するかを確認する。

その結果、(3) の技術で作成した 2.5D 地図により、(2) の技術を適用している際に床面計測結果を正しく分離することができた。このことから、(3) の技術が非水平床面に対応する (2) の技術の利用に対し十分な精度の 2.5D 地図を作成可能であることを実証した。

以上の通り、周囲物体配置が時々刻々変化し、床面上に非水平箇所を有する環境にて正常動作する環境認識が、実用化済み技術と同程度の演算コスト、作業コスト、センサ構成価格にて、十分な持続性を持って実現され、本研究の目的を達成した。

これにより、自律移動ロボットの適用範囲が拡大され、無人フォークリフトやオフィスロボットなどの実現と普及に向けたボトルネックを解消することができる。例えば、物体配置変化に対応した環境認識技術により、本研究で対象とした棚を用いる倉庫において、無人フォークリフトを自律的に移動させることが可能になる。また、非水平床面に対応した環境認識技術により、部屋間やフロア間がスロープや段差などで繋がっているオフィスにおいて、それらの間を往来するロボットが床と未知の障害物とを混同することなく周囲状況を把握し適切な行動をとることが可能となる。さらに、それらの技術を組み合わせて用いることで、床面に盛り上がりのある倉庫における無人フォークリフト、あるいは、会議室などの机や椅子の配置を自動で整列させるオフィスロボットなどの自律移動を、本手法によって実現することが可能になる。