

報告番号	※ 甲 第 10607 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 可変分解能処理による移動ロボットの運動特性を考慮したロードマップ生成

氏 名 項 警 宇

論 文 内 容 の 要 旨

近年、惑星探査、放射線危険区域や医療福祉などで移動ロボットの需要が高まっている。特に惑星探査や放射線危険区域などの多くの場所では、レールなどの専用インフラを整備することが困難であるため、ロボットが自律的に安全に移動することが求められている。移動ロボットが同じ作業環境内を繰り返し移動する場合、作業環境を表現した地図を保持し、地図を再利用した方が有利である。移動ロボットの移動に適した地図の表現方法には複数存在するが、本論文では未知環境への適用の容易さ、手法の拡張性の観点において有利であるロードマップ法を用いる。しかしながら、従来のロードマップ法は移動ロボットの走行安全性を考慮してなく、経路計画後に Elastic Band 法と呼ばれる手法などを用いて、経路を修正する必要がある。そこで、本研究では移動ロボットの走行安全性を考慮した地図に着目し、走行安全性を考慮したロードマップの生成手法に取り組む。

ロードマップ法の生成及び利用時において、環境を表現する精度をどうするかということが問題点として挙げられる。なお、本研究では環境を表現する精度を分解能と呼ぶ。高分解能なロードマップは環境を詳細に表現でき、安全な経路を正確に計画できる代わりに、地図生成に必要な計算量や地図保持に必要な記憶領域量が膨大になる。また、そのロードマップを用いた経路計画で必要とされる計算量が膨大になる。一方、低分解能なロードマップは環境を粗雑に表現しているため、地図生成時の計算量と地図保持に必要な記憶領域量を低減できる。しかしながら、粗雑なロードマップで安全な経路計画を行うことは非常に困難である。この問題に対して、作業環境表現の分解能を可変にしたロードマップとして、低分解能なロードマップと高分解能なロードマップを組み合わせたハイブリッドマップが提案されている。しかしながら、従来の手法は地図保持に必要な記憶領域量や計算量の削減を目的としており、移動ロボットの走行安全性を考慮したものではない。そこで、本研究では移動ロボットの走行安全性を考慮して分解能を可変にすることに取り組む。

移動ロボットの軌道を計画する際、移動ロボットの動特性をも考慮する必要がある。従来のロードマップ法は移動ロボットの動特性を考慮してなく、単に作業環境を表現している。そのため、それらのロードマップを用いた経路計画では移動ロボットが通過する位置の系

列しか計画できない。この問題に対して、計画された経路に追加処理を施すことで実際の軌道を生成する手法が提案されている。一方、移動ロボットのコンフィギュレーションのみならず、速度等をも含んだ状態空間上で軌道計画を行う動作計画問題がある。一般的にコンフィギュレーションと速度を考慮した状態空間内の二点を結ぶ直線分はロボットの実現可能な軌道を表現しない。この問題に対して、いくつかの計画手法が提案されているが、いずれも一組の初期位置と目標位置に対して軌道を計画する手法であり、同一の作業空間であっても異なる位置設定に対しては結果を再利用できない。このように、ロボットの動特性を考慮した再利用可能なロードマップ法は未だ提案されていない。

以上の背景より、可変分解能処理に基づいて移動ロボットの走行安全性を考慮したロードマップ法を提案し、その有用性を検証する。

第二章ではグラフ表現を用いた地図（以降、グラフ地図）での経路計画問題の定式化とグラフ探索について述べる。グラフ地図での経路計画にはグラフ探索手法が用いられる。代表的な手法としてダイクストラ法やA*探索法などが挙げられ、これらの手法を用いることで目標までの最適経路をオフラインで計画できる。また、探索できる探索深さや探索時間が有限などの制約に対応した実時間グラフ探索手法もある。実時間グラフ探索手法は不完全なグラフ地図での探索にも有効である。

第三章では未知環境下において移動ロボットがセンサ情報のみに基づいて適切な分解能を持つロードマップを自律的に生成する手法の提案と検証を行う。ここでは、全方向移動が可能な移動ロボットが未知の作業空間において、指示された目標地点へ向かいつつ、ロードマップを生成する問題について考える。ただし、議論を簡単にするために、ロボットは作業空間上の自身の位置を取得可能であるとする。

提案するロードマップは従来のロードマップを構成するノードとリンクに対してセルを加えた三つの要素によって構成される。ノードは作業空間の位置を表し、リンクはノード間の接続関係を表す。各ノードにはそのノードを中心として観測可能な所定の距離以内の自由空間の領域を表すセルが付随する。所定の距離はノードの周囲環境に依存し、ノード上の観測情報を基に反復計算で決定される。障害物が近いと小さくなり、遠いと大きくなる。これにより、危険な領域は数多くの小さなセルで構成され、安全な領域は少数の大きなセルで構成される地図を自動に生成できる。ノードとリンクの生成手法はいくつかの簡単なルールセットから成り立っており、セルもそれらの生成時の判断基準として用いられる。経路計画には実時間グラフ探索手法の一つであるRTA*探索手法を適応させる。なぜならば、未知環境下を地図生成しながら移動するため、不完全なグラフ上でグラフ探索を行う必要があるからだ。このように、提案手法ではロードマップは複雑な計算を行わずに生成し、なおかつ経路計画にはRTA*探索手法を用いているため、実時間処理に適している。

最後に数値シミュレーションと実機実験で提案手法の有用性を検証する。まず、数値シミュレーションでは導出したパラメータ値に対する条件の妥当性について定量的に考察し、RTA*探索の実時間性を裏付けする。次に実機実験では、試行を繰り返すことで、既存のロードマップを利用しつつ、ロードマップを拡充する提案手法の特性を確認する。

第四章ではホロノミック拘束を有する移動ロボットの走行安全性に基づく可変分解能速度マップ生成手法（以降，VVR）の提案と検証を行う。ここでは二次元平面上を全方向移動が可能なロボットを対象とする。対象とする移動ロボットの速度空間を適切な分解能に分割するロードマップ生成手法を提案する。ロードマップを生成する空間として，移動ロボットの位置を表す二次元の位置空間に，移動ロボットの速度を表す二次元の速度空間を加えた四次元の状態空間を考える。ただし，位置を表す二次元のロードマップは既存の手法で与えられるものとし，そのロードマップに領域で表される速度空間の情報を付加する。

作業環境の幾何学的な安全性しか考慮していない従来のロードマップに対して，提案するVVRでは移動ロボットの衝突回避および性能制約についても考慮している。VVRの各ノードは位置と速度からなる状態空間上の領域を表す。ただし，位置は点であり，速度は領域である。リンクは有向リンクであり，あるノードが代表する状態空間上の領域の任意の点から，別のあるノードが代表する領域上の任意の点へ移動する適切な制御入力が存在し，二つのノード間が移動可能であることを表す。ここで，適切な制御入力とは安全および性能制約を満足する制御入力を意味する。速度領域の適切な大きさは事前には未知であるため，可変分解能処理に基づいたVVRの生成手法を提案する。提案手法では衝突回避および性能制約を満足する速度領域全体が凸集合となるように選択することで，地図生成における計算コストを低減している。

最後に数値シミュレーション上にて提案手法の有用性を検証する。まず，環境による有向リンクの生成と領域の分割の違いを示す。次にある環境に対してVVRを生成し，経路計画結果を示す。最後に分解能が一樣に高い速度マップとの比較を行うことで提案するロードマップの有利点を示す。

第五章では非ホロノミック拘束を有する移動ロボットの走行安全性に基づく可変分解能姿勢マップ生成手法（以降，VOR）の提案と検証を行う。ここでは二次元平面上を移動する車両型移動ロボットを対象とする。移動ロボットの姿勢空間を適切な分解能に分割するロードマップ生成手法を提案する。VORを生成する空間として，第四章で用いた速度空間の代わりに移動ロボットの姿勢を表す一次元の姿勢空間を加えた三次元の配位空間を考える。VVRと同様に二次元のロードマップに領域で表される姿勢空間の情報を付加する。VORはVVRと同様に移動ロボットの衝突回避および性能制約についても考慮する。VORの各ノードは位置と姿勢からなる配位空間上の領域を表す。ただし，位置は点であり，姿勢は領域である。基本的な生成方法はVVRと同様であるため，本章では第四章では議論しなかった制約を満たす領域の具体的な条件について議論し，それをを用いた生成方法について述べる。

最後に数値シミュレーションで提案手法の有用性を検証する。まず，制約条件による有向リンク生成の違いについて示し，ある環境に対して地図生成と経路計画を行う。さらに，提案手法を用いて構築した自動駐車システムの有用性を数値シミュレーションと実機実験で検証する。

第六章において本論文のまとめを述べ，今後の課題について述べる。第三章では未知環境下で自律移動ロボットが自律的にロードマップを生成しつつ，目的地点に向かうことがで

きた。しかしながら、ノードの生成位置に対して障害物の危険性を考慮できていない。そのため、走行安全性という点では不十分であると言える。第四章ではホロノミック型の移動ロボットの動特性を考慮したロードマップを提案した。しかしながら、移動ロボットの動特性を考慮しているのに、時空間への考慮が不十分であるという欠点が残っている。第五章では非ホロノミック型の移動ロボットの動特性を考慮したロードマップを提案し、新たな自動駐車システムを構築した。そして、有効性を実機実験で示した。しかしながら、用いた移動モデルの性質により、可変分解能が機能した結果であるとは言い難い。そのため、可変分解能がうまく機能する移動モデルが必要であると言える。