

氏名	リン シコウ LIN Ziang
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1330号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	移動ロボットを滑らかに制御するためのローカル経路計画手法とその高速化 (Local Path Planning Algorithm for Smooth Control of Mobile Robots and Their Acceleration)
論文審査委員	主査 准教授 田口 亮 教授 加藤 昇平 准教授 坂上 文彦 教授 梅崎 太造 (中部大学)

論文内容の要旨

現代社会の発展に伴い、人々の移動ロボットに対するニーズはますます広がってきており、宇宙探査から日常生活における掃除や配達などの様々なシーンで、移動ロボットは幅広い応用が期待されている。移動ロボットの分野では、経路計画と運動制御が重要な役割を果たしている。経路計画は、与えられた環境において初期位置から目標までの最適な経路を計画するグローバル経路計画と、グローバル経路に従いつつ障害物と衝突しない経路をリアルタイムに生成するローカル経路からなる。様々な環境において、ロボットは障害物を回避し、環境の変化に迅速に対応し、安全を確保しながら効率よく目標地点に到達することが望ましい。一方、運動制御とは、経路計画から導き出された経路を実行するためにロボットを制御する具体的な指令を算出することである。実際のロボットの運動制御では、安定した効率的な運動を実現するために、ロボット自身の物理的特性や外部環境の影響などを考慮する必要がある。

ローカル経路計画の手法の一つである DWA (Dynamic Window Approach) は、ローカル経路計画と運動制御を統合した手法であり、ROS (Robot Operating System) のデフォルトのローカル経路計画手法に採用されるなど、広く一般的に用いられている。DWA は、ロボットが実行可能な速度指令空間と、タスクに応じた評価関数を定義することで、

障害物に衝突しない速度指令を出力することができる。

しかし、従来の DWA には二つの問題がある。一つ目は、実現可能な経路の一部しか予測できないという問題である。DWA では、経路を予測する際に、速度が一定であることを仮定している。そのため、加減速を伴う経路は計画することができず、障害物の回避に失敗する場合がある。二つ目の問題は、躍度が制御できないという点である。躍度(Jerk)とは加速度の時間微分である。躍度が大きくなると、力積の増大を招くため、ロボットが転倒したり、内部の部品にダメージを与えたりする。また、乗り物の場合には、躍度が大きくなると乗客に不快感を与えることも知られている。したがって、躍度を制御できるようになれば、ロボットの安全性や頑健性を高めるだけでなく、感性品質の向上にも寄与する。

そこで本論文の第 4 章では、躍度で制御可能な DWA を提案する。従来の DWA では並進速度と角速度を選択するが、提案手法では、並進躍度と角躍度を選択する。また、従来は、予測期間中の速度が一定であることを仮定するが、提案手法では、予測期間中の躍度が一定であることを仮定し、速度と加速度には一定を仮定しない。これにより、従来よりも現実に即した経路計画が可能となる。さらに、躍度を抑えた滑らかな加減速を計画することもできる。仮想環境を用いた実験により、提案手法は、(1)最大躍度が容易に制御可能であること、(2)最大速度で走破出来ないような環境において、従来手法よりも走行時間を短縮できる可能性があることを示した。また、実環境を用いた実験では、速度制御の精度限界により、最大躍度を規定値に収めることはできなかったが、平均躍度の低減と非線形の速度制御が可能であることが確認された。

また、従来の DWA では離散的な経路点を用いて予測経路を表しており、経路点を生成するための繰り返し計算が必要である。衝突検知を行う際には、膨大な経路点と障害物点の点群間距離の最小値を求める必要があり時間がかかる。

そこで本論文の第 5 章では、予測経路を離散的な経路点ではなく円弧を用いてモデリングし、衝突検知を行う手法を提案する。経路予測に等速モデルを利用する場合、円弧で経路を表現することで、衝突検出の計算を容易にする。さらに、経路予測に変速モデルを利用する場合、その経路は円弧にはならないが、本論文では複数の円弧を用いて経路を近似し、衝突検出を行う手法を提案する。提案手法では、経路点を生成するための繰り返し計算が不要であるため、制御周波数を高くすることが可能となり、環境の変化にも迅速に対応できるようになると想定される。計算時間と精度の間にはトレードオフの関係があるため、個別の比較では手法の優劣を総合的に評価できない。そこで、2つの実験により、従来手法と提案手法の品質コスト曲線を比較し、提案手法の優位性を示した。

本研究の成果は、柔らかな動作制御と速やかな反応を持つロボットの発展に貢献すると考える。

論文審査結果の要旨

社会の発展に伴い、宇宙探査から日常生活における掃除や配達などの様々なシーンで、移動ロボットは幅広い応用が期待されている。移動ロボットの分野では、経路計画と運動制御が重要な役割を果たしている。経路計画は、与えられた環境において初期位置から目標までの最適な経路を計画するグローバル経路計画と、グローバル経路に従いつつ障害物と衝突しない経路をリアルタイムに生成するローカル経路からなる。ローカル経路計画の手法の一つである DWA(Dynamic Window Approach)は、ローカル経路計画と運動制御を統合した手法であり、広く一般的に用いられている。従来の DWA には二つの問題がある。一つ目は、実現可能な経路の一部しか予測できないという問題である。DWA では、経路を予測する際に、速度が一定であることを仮定している。そのため、加減速を伴う経路は計画することができず、障害物の回避に失敗する場合がある。二つ目の問題は、躍度が制御できないという点である。躍度(Jerk)とは加速度の時間微分である。躍度が大きくなると、力積の増大を招くため、ロボットが転倒したり、内部の部品にダメージを与えたりする。また、乗り物の場合には、躍度が大きくなると乗客に不快感を与えることも知られている。したがって、躍度を制御できるようになれば、ロボットの安全性や頑健性を高めるだけでなく、感性品質の向上にも寄与する。

そこで本論文では、躍度で制御可能な DWA が提案されている。従来の DWA では並進速度と角速度を選択するが、提案手法では、並進躍度と角躍度を選択する。また、従来は、予測期間中の速度が一定であることを仮定するが、提案手法では、予測期間中の躍度が一定であることを仮定し、速度と加速度には一定を仮定しない。これにより、従来よりも現実に即した経路計画が可能となる。さらに、躍度を抑えた滑らかな加減速を計画することもできる。仮想環境を用いた実験により、提案手法は、(1)最大躍度が容易に制御可能であること、(2)最大速度で走破出来ないような環境において、従来手法よりも走行時間を短縮できる可能性があることが示された。また、実環境を用いた実験では、平均躍度の低減と非線形な速度制御が可能であることが確認された。

また、従来の DWA では離散的な経路点を用いて予測経路を表しており、経路点を生成するための繰り返し計算が必要である。衝突検知を行う際には、膨大な経路点と障害物点の点群間距離の最小値を求める必要があり時間がかかる。そこで本論文では、予測経路を離散的な経路点ではなく円弧を用いてモデリングし、衝突検知を行う手法が提案されている。経路予測に変速モデルを利用する場合、その経路は円弧にはならないが、本論文では複数の円弧を用いて経路を近似し、衝突検出を行う手法を提案している。提案手法では、経路点を生成するための繰り返し計算が不要であるため、制御周波数を高くすることが可能となり、環境の変化にも迅速に対応できるようになると想定される。計算時間と精度の間にはトレードオフの関係があるため、個別の比較では手法の優劣を総合的に評価できない。そこで、2つの実験により、従来手法と提案手法の品質コスト曲線を比較することで、提案手法の優位性が示された。

本論文の成果は、柔らかな動作制御と速やかな反応を持つロボットの発展に貢献すると考える。

これらの成果は1篇の査読付き学術論文誌、および、2件の査読付き国際会議で公表されている。また、もう1篇の査読付き学術論文誌について採録決定が得られており、論文誌の発行待ちの状況である。2024年2月20日に実施された博士論文公聴会での発表と質疑応答、ならびに論文内容の審査により、博士(工学)の学位授与にふさわしい論文であるとの結論に至った。