

ノンホロノミック移動ロボットの動力学を考慮した 軌道計画

盛永, 明啓

<https://doi.org/10.15017/1654876>

出版情報：九州大学, 2015, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名 : 盛永 明啓

論 文 名 : ノンホロノミック移動ロボットの動力学を考慮した軌道計画

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

多くの機械システムは本質的に非線形システムと考えられる。この非線形システムには単純な線形化では対応できない強い非線形性を有する機械システムが存在し、軌道生成や制御が困難な対象として知られている。本論文では、このような取り扱いが困難な非線形システムで、特に動力学を考慮しなければならない非線形システムの動作軌道計画問題を検討した。第1章では、本論文で研究対象とするノンホロノミックシステムの概要と研究目的について述べた。ここでは、運動学的なノンホロノミック拘束を受ける移動ロボットにおいて、特にロボットの動力学と運動学を切り離すことができないシステムを対象とする軌道計画を検討した。軌道計画問題は、初期状態と目標状態とを結ぶ軌道と入力を求めることを目的とする。ノンホロノミック拘束を受けるシステムの運動学モデルの多くは、対称アフィンシステムとしてモデル化される。既存研究において、対称アフィンシステムを対象とする軌道計画問題は多く研究されている。一方で、ロボットの運動方程式を対象に軌道計画を行うことは、状態変数の数が増加することで可制御性を示すことが困難となり、解となる軌道の存在が保証できない問題を生じる。一部の運動学的な拘束条件を受ける移動ロボットでは、運動方程式から運動学モデルを分離することが可能である。この場合は移動ロボットの軌道計画問題を、その運動学モデルを対象とした軌道計画問題として置き換えることができる。しかし、移動ロボットの動学的な要素が本質的に運動に影響を及ぼす場合には、動力学を含めた軌道計画を行う必要がある。そこでここでは、移動ロボットの軌道計画問題において動力学を考慮する必要がある場合として、2軸慣性ロータによって駆動される球型ロボットの軌道計画問題と、滑りを伴う車両の軌道計画問題を取り上げた。

第2章では、2軸の慣性ロータによって駆動される球型ロボットの軌道計画を検討した。対象とする球型ロボットは、球殻と駆動機構で構成され、その運動学はノンホロノミックシステムである球体の転がり接触としてモデル化される。球体の転がり接触モデルは、球の位置と姿勢を状態変数とし、角速度を入力変数とする対称アフィンシステムとなる。特に鉛直軸周りの角速度は発生しないと仮定した純転がり運動学モデルを対象として、既存研究においていくつかの軌道計画手法が提案されている。また、慣性ロータが3軸に配置されている場合は、逆動力学計算を解くことで運動学モデルの入力にあたる角速度を発生させるための入力トルクが求められる。よって、球型ロボットの軌道計画問題は、球体の転がり接触モデルを対象とした軌道計画問題に置き換えることができる。しかし、球型ロボットに2軸のみ慣性ロータが配置されている場合は、任意の角速度を発生させることができない。この時、軌道計画においてロボット動力学を考慮する必要がある。そこで、角運動量保存則に基づいて、球殻に関する動力学モデルを積分し、球の運動学モデルと合わせて5つの状態変数と2つの制御入力によって構成される制御モデルを導出した。本研究では、導出した

モデルに対して、2つの異なる手法によって得られる軌道を組み合わせて軌道計画を行った。一つ目は、慣性ロータが配置される大円(球面上における赤道)に直交する測地線に基づいた幾何学的なアプローチによって得られる軌道である。本軌道に沿った球の運動では鉛直軸周りの角速度が発生しないため、解析的に軌道に沿った状態の変化量を計算することができる。二つ目の軌道は、**nilpotent approximation** と **iterative steering** を組み合わせて得られる軌道である。このとき **nilpotent approximation** において現れる特異点を回避するために、球面上の接触点座標系の原点に当たる南極点を原点とした近似モデルを構築し、南極点を含む半球面のみを通るような軌道を求めた。また、球面上の接触点を変化させずに接触角と平面上の接触点位置を目標状態へ到達させるために、球面上の接触点軌道が閉軌道となるように入力を決定した。最後にシミュレーションにより本軌道計画の有効性を確認した。また、**iterative steering** において中間目標点を設定するパラメータを決定するための異なるアルゴリズムを示し、それぞれ動力的なパラメータである慣性比率による収束性の変化を比較してアルゴリズム収束性の考察を行った。

第3章では、タイヤの滑りを含めた車両の運動生成問題として、ドリフト車庫入れ問題を扱った。ドリフト車庫入れ問題は、隙間なく障害物に囲まれた駐車スペースへの車庫入れを目的としており、滑らない車輪を仮定した繰り返し動作によっては目標状態へ到達することができない。従って、滑りを含めた軌道計画を行う必要がある。滑りに伴って生じるタイヤ摩擦力を含めた車両の動力学モデルを考慮する必要がある。これまで滑りを含めた車両の制御に関する多くの研究では、車体速度を制御することを目的としており、位置や姿勢を目標状態に含まなかった。また、タイヤが滑っている状態では、ノンホロノミック拘束を受ける車両のように運動学モデルを分離して扱うことができなかった。さらに従来のノンホロノミックシステムの枠組みの中では、滑りを外乱としてではなく状態の1つとして扱うことは困難であった。車両の走行の中でドリフト走行を有効かつ安全に用いるためには、タイヤが滑っている際にどのような軌道を描くかを事前に知る必要がある。初めに、ノンホロノミックシステムの軌道計画において滑りが無い場合と滑りがある場合を連続的に接続するために、拡張クーロン摩擦モデルを定義した。本摩擦モデルは、ノンホロノミック拘束を発生させるための一般化力であるラグランジュ乗数と、動摩擦を表すクーロン摩擦力を組み合わせたモデルとなっている。タイヤの滑りに対応して二つの摩擦の状態が切り替わり、ノンホロノミックシステムとしての車両の軌道とタイヤが滑る車両の軌道を組み合わせることが可能となった。また、タイヤの縦方向と横方向の摩擦を **2D-Coulomb** モデルに基づき組み合わせることで摩擦モデルを拡張した。次に、ドリフト車庫入れに対する軌道計画として、初めにノンホロノミック拘束を受ける車両の軌道計画と、タイヤが滑っている車両の軌道計画をそれぞれ行った。ノンホロノミックシステムとしての車両の軌道計画は、従来手法を用いて行うことが可能であるが、意図しないタイヤの滑りが発生しないために、ラグランジュ乗数に関する拘束条件を考慮する必要がある。また、滑っている車両については速度のみ制御を行った。最後に、二つの状態を組み合わせることによってドリフト車庫入れが可能となることをシミュレーションにより示した。

以上、本論文では移動ロボットの軌道計画において、運動学だけでなく動力学についても考慮する必要がある問題として、球型転がりロボットの軌道計画問題とドリフト車庫入れ問題を取り上げ、これらの問題に対する軌道計画手法を提案した。