

内96-3

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

移動型マニピュレータの安定性を
考慮した運動計画に関する研究

申請者

黄 強

Qiang Huang

機械工学専攻・精密工学研究

1996年 7月

本論文では、ヴィークル上にマニピュレータが搭載された移動型マニピュレータ(Mobile Manipulator)が様々な環境において移動しながら作業を遂行する際の、安定性の評価規範、安定性の維持手法、ヴィークルとマニピュレータの協調運動計画について論じた。

現在実用化されている産業用ロボットのほとんどは据置型であり、限定された動作範囲内でのみしか作業ができない。しかし今後、医療福祉やサービスなど人間と同等の広い作業範囲での巧みな作業にロボットが活躍の場を展開してゆく際には、ロボットの形態としてヴィークル上にマニピュレータが搭載された移動型マニピュレータが有効であると考えられる。

マニピュレータに大型の移動機構を接続した場合、高い安定性（転倒防止）は得られるものの、広い移動スペースが必要となり、作業の応用場面が限定される。また、エネルギー消費や運動性能なども問題となる。以上のことと、オフィスや家庭内などの作業への応用を考えると、移動機構はできるだけ小型化を図る必要がある。しかし、マニピュレータを小型移動機構に搭載した場合、移動型マニピュレータ全体の安定性が課題となる。

これまでの移動型マニピュレータの安定性に関する研究は、主として重心位置を用いた静的な安定性についてのみ行われている。移動型マニピュレータの作業時の安定性は、ヴィークルの運動、マニピュレータの姿勢と運動、手先の力の間に密接な関連がある複雑な問題であるため、これまでダイナミクスを考慮した検討が十分になされていない。

また、これまでのヴィークルとマニピュレータの協調運動計画に関しては、基本的にヴィークルの移動とマニピュレータの作業姿勢の優先順位を固定した場合の手法である。環境や作業内容が複雑な場合には、例えば、作業姿勢を重視すべき場合にはマニピュレータの運動を優先し、また移動平面に障害物が多い場合にはヴィークルの運動を優先するなど、移動とマニピュレーションの協調関係が変化するため、これまでは、環境、作業内容とも単純な場合にのみしか適応できなかった。更に、安定と作業を両立した協調運動計画に関する研究例は見られない。

一方、脚式ロボットの研究においては、常に安定性が課題となるため、多くの研究例があるが、そのほとんどが移動時の安定性を対象としており、マニピュレータによる作業と移動との協調については考えられていない。

そこで、本研究では、ロボットが様々な環境に適応して安定に移動しながら作業することができる、安定と作業を両立したマニピュレータとヴィークルの協調運動を導出することを目的とした。

以下に、順に各章ごとの概要を述べる。

第1章は序論である。これまでの移動型マニピュレータの研究を総括・分析し、研究課題の所在を明らかにし、それをもとに、本研究の目的、位置づけ、方法を述べた。

第2章では、環境外乱を考慮した動的な安定性の評価規範、安定性回復のZMP軌道生成、マニピュレータによる安定性の補償範囲について述べた。

まず、ロボットと路面との間に作用している慣性力によるモーメントを考え、動的な安定性を力学的視点から判別するZMP規範について考察した。そして、ZMPの位置と安定領域の位置関係における安定性評価指標として安定度を定式化した。さらに、環境外乱を考慮した安定性判別として、有効安定領域の概念を定義した。これらをもとに、作業と安定化の制御規範を明らかにした。

ZMPが有効安定領域内に存在する場合、許容内の外乱が影響してもロボットは安定であり、安定化動作をしなくても作業が遂行可能である。ZMPが安定領域内で有効安定領域外に存在する場合、外乱が影響すればロボットが不安定になる可能性があり、作業と安定化動作を同時に行う必要がある。また、ZMPが安定領域外に存在する場合、ロボットが不安定となるため、安定化動作のみを行わなければならない。

次に、安定性維持と安定性回復は、マニピュレータと移動機構の協調運動により行うが、その運動を生成するための基礎となるZMPの安定性回復用の修正軌道を生成しなければならない。ここでは、安定領域の中心と境界に関するポテンシャル関数を用い、ポテンシャルの勾配法によりZMPの安定性回復の軌道生成を行う方法を提案した。

この方法では、安定領域外の不安定な状態の近傍では、ZMPはほぼ最大変化率で安定領域に接近し、安定度はほぼ最大に増加する。また、安定領域内中心の安定な状態の近傍では、ZMPは安定領域の中心の方向へほぼ直線状に接近し、安定度が増加する。

次に、マニピュレータの姿勢変化による安定性の補償範囲を分析し、作業設定やヴィークルの運動計画などにおいて、マニピュレータによる安定性補償範囲の目安として、静的な姿勢変化による安定性補償範囲を提案した。

作業中にZMPが有効安定領域外となっても、それがマニピュレータの静的な安定補償範囲内にあれば、マニピュレータの姿勢変化を利用してZMPを変化させることでシステムの安定性を維持することができる。

第3章では、安定と作業を両立したヴィークルとマニピュレータの協調運動計画について述べた。

安定と作業の両立を考慮した協調運動の方策として、マニピュレータの作業姿勢を考慮したヴィークルの運動計画と、安定性補償を含むマニピュレータの運動計画を組合せた協調運動の計画方法を提案した。

まず、障害物の回避、経路の長さ、動特性などといった移動ロボット固有の軌道計画の要素に加え、マニピュレータの作業範囲、システム全体の安定性なども考慮したヴィークルの概略運動を導いた。

具体的には、はじめに障害物の回避、経路の長さ、経路の連続性などを考慮したヴィークルの経路を計画する。そしてその経路に沿って、マニピュレータの作業範囲、システム全体の安定性、ヴィークルの動特性を考慮した通過点と通過時間を最適に選ぶ問題を定式化し、さらに射影勾配法を用いてヴィークルの運動を導く。

なお、本章で提案したヴィークルの動特性の最適問題の導出手法は、決定した経路上に沿う通過時間を制約する場合の移動ロボットの運動計画にも適用できる。

次に、計画されたヴィークルの運動を実行する際に、最適の作業姿勢と安定維持を両立させるマニピュレータの姿勢変化を導いた。

具体的には、まず安定性を考慮しないで可操作度が最大である作業の最適な姿勢を決め、そしてシステムの安定性を維持すると同時に可操作度ができるだけ大きくなるZMP軌道を求める。次に、求めたZMP軌道を実現するための冗長自由度を有するマニピュレータの姿勢変化の問題を定式化し、ルンゲクッタ法によりマニピュレータの運動を導出する。

第4章では、シミュレーションにより本論文で提案した手法の有効性を示した。

移動型マニピュレータの安定性を考慮した作業を、ヴィークルの運動が与えられた場合とマニピュレータ手先の運動が与えられた場合の2通りのレベルにまとめ、提案した手法はこれらのレベルに適用した結果について述べた。

第5章は結論であり、これまでの各章で得られた成果をまとめた。また、本研究で得られた成果をもとに、今後の研究の発展と展望について述べた。