

学位論文題名

ロボットマニピュレータの運動制御に関する研究

学位論文内容の要旨

与えられたロボットマニピュレータの経路追従制御性能を向上させるためには、より良いサーボ系設計への努力と適切な軌道計画の二つの要素がある。それらを別々に考えるのではなく、この二つを融合した形で最善のシステムを構成するべきである。このことを基本的な立場として、関節角に対して与えられる目標値に着目し、サーボ系の特性を考慮する可変速軌道計画によるロボットマニピュレータ経路制御法が提案されている。しかし、この方法では始動と停止に対しては別の処理をしなければならないとか、アクチュエータのトルク制限を積極的には扱っていないとか、アルゴリズムが複雑であるなどの問題があった。本研究では、これらの問題点を解決するために、人間の定性的な知識による判断を軌道計画に導入して、ファジィ軌道計画を提案している。

また、以上の方法では、サーボ系の特性を考えるために、円近似の概念を利用しているのですが、原理的には多自由度のロボットマニピュレータに適用できるが、そのアルゴリズムはかなり複雑である。また、各軸サーボ系の目標値を設計するとき、各軸の基準角周波数（ゲインおよび位相とも劣化しない最大の角周波数）の中で、最小値の基準角周波数を採用せざるを得ないので、一つの軸のサーボ系は無理無駄のないように利用されるが、他の軸のサーボ系は能力を十分発揮できない形になってしまう。したがってこれらの問題点を根本的に解決するために、本研究においては、関節空間を明確に定義し、与えられた経路のP表現（Phase表現）という概念を導入した。このことにより従来の方法では不可能であった各軸のサーボ系の性能を最大限に発揮できるようになる。また多自由度のロボットマニピュレータへの適用も容易なロボットマニピュレータ経路制御を可能とする方法を提案した。シミュレーションによりこの方法と従来の方法とを比べ、その有効性を検証した。

ロボットマニピュレータなどのような非線型メカニカルシステムの目標値追従制御性能を向上させるため、その制御を実現するためのアクチュエータ制御にはアナログ制御でなくて、デジタルサーボさらにはソフトウェアサーボを用いる必要がある。したがって、ロボットマニピュレー

タのダイナミックスを考慮に入れたデジタル制御の系統的な設計法を開発する必要があると考えている。このことにより、本研究においては、メカニカルシステムの運動の本質に注目して、特に、外力と加速度との瞬間的關係を利用することにより、ロボットマニピュレータの経路追従制御のためのデジタル加速度制御法を提案した。また、線形メカニカルシステムにしても、非線形メカニカルシステムにしてもそのシステムの運動の様子は加速度によって決められ、モデル化できない各種の摩擦を含む非線形メカニカルシステムの目標値追従制御の場合、メカニカルシステムの加速度情報を適切に利用すればデジタル制御系を構成できるということを明らかにした。さらに、デジタル加速度制御法と従来から良く知られている計算トルク法との違いについても理論的に論じた。さらに実験によりこのデジタル加速度制御法の有効性を明らかにした。

ロボットマニピュレータの軌道追従制御においては、目標軌道が運動の前に計画されて利用できるが、これまで軌道の未来情報を利用するということはあまり積極的に議論されていない現状である。しかし、目標軌道の未来情報を利用することにより、自動車の運転と同じ理由で、軌道追従制御性能を改善させることが可能である。したがって、本研究では、デジタル加速度制御法に基づく予見制御系を構成した。これにより、モデル化できない各種の摩擦を含むロボットマニピュレータの経路追従制御に適用できるものとなっている。シミュレーションと実験を通じて軌道の未来情報を利用しない制御法に比べて、追従性能の改善が得られることを示した。

また、通常では、非線形システムのデジタル適応制御を行う場合、その非線形システムを何らかの方法により線形化して、そして得られた線形モデルに線形デジタル適応制御理論をそのまま使っている。一方有名な J. J. Slotine と W. Li によるロボットの適応制御方式においてはその前提は、動力学モデルを動力学パラメータの線形関係の形に表現することができることである。しかし、実際には非線形システムに対し、必ずしもこの条件が満たされていないので、この場合理論的に期待された制御性能を達するのが困難である。この現状に対して、本研究においては、まったく違う立場に立って、ロボットマニピュレータだけではなく、もっと広い意味での実在の物理システムに対して、その物理的な運動の本質に基づいて、モデルの具体的な形とパラメータが判らない非線形システムのデジタル適応制御法を提案した。さらにシミュレーションによりその有効性を検討した。

最後に、上述のP表現による軌道計画においては経路上を移動する目標点の速度をオフラインで計画しているため、ロボットマニピュレータが経路を追従する状態を実時間的に考慮に入れることができなかった。実際に制御を行うとき初期誤差や外乱などの原因でロボットマニピュレータが経路から外れる恐れがあるから、軌道計画を行うときにロボットマニピュレータの追従状態

を実時間で監視する必要がある。このことから、本研究においては、オンラインファジィ軌道計画によるロボットマニピュレータ経路追従制御法を提案した。すなわち、ファジィ推論に基づいて、制御しながら、現在のサーボ系の追従誤差を監視するように、経路から軌道を決める方法である。また、上述のデジタル加速度制御法を用いてロボットマニピュレータの経路追従制御のサーボ系を構成し、実験によりオンラインファジィ軌道計画による経路追従制御の有効性を明らかにした。

本論文の第1章では、本研究の背景および本論文の主張について述べている。

第2章においては、オンラインファジィ軌道計画の概念とそのロボットマニピュレータ経路追従制御への応用を述べている。

第3章においては、多自由度のロボットマニピュレータへの適用も容易なP表現に基づくロボットマニピュレータ経路制御法を論じている。

第4章では、デジタル加速度制御法を論じている。

第5章では、デジタル加速度制御法に基づく予見制御系の構成について述べている。

第6章では、非線形システムのデジタル適応制御について述べている。

第7章では、オンラインファジィ軌道計画によるロボットマニピュレータ経路追従制御法を論じている。

第8章では、本研究による成果と今後の課題をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士

副 査 教 授 長 谷 川 淳

副 査 教 授 島 公 侑

本論文は、産業用ロボットを対象として、その自律的かつ高速・高精度の経路追従制御を実現することを目的としている。そのため、サーボ系の特性を考慮した軌道計画法およびデジタルサーボ系の構成法に関して理論的に研究し、理論上の有益な方法を得ることを目的として研究したもので、その主要な経過は以下のようにまとめられる。

(1) 自律性を実現するために、まず人間の定性的な知識による判断を軌道計画に導入して、サー

ボ系の特性を考慮したオフラインファジィ軌道計画法を提案している。この軌道計画法は、原理的に多自由度のロボットマニピュレータに適用できるが、そのアルゴリズムはかなり複雑である。また、各軸サーボ系の目標値を設計するとき、各軸の基準角周波数（ゲインおよび位相とも劣化しない最大の角周波数）の中で、最小の基準角周波数を採用せざるを得ないので、一つの軸のサーボ系は無理無駄のないように利用されるが、他の軸のサーボ系は能力を十分発揮できない形になってしまう。したがってこれらの問題点を根本的に解決するために、本研究においては関節角に対して与えられる目標値に着目し、関節空間を明瞭に定義し、与えられた経路の Phase 表現という概念を導入した。このことにより従来の方法では不可能であった各軸のサーボ系の性能を最大限に発揮できるようになる。また、多自由度のロボットマニピュレータへの適用も容易な最適軌道計画法を検討している。シミュレーションによりこの方法と従来の方法とを比べ、その有効性を検証した。ところが、場合によってロボットマニピュレータの経路追従状態で実時間で監視する必要がある。この二つの方法はオフラインで軌道を計画しているものであるため、ロボットマニピュレータが経路を追従する状態を実時間的に考慮に入れることができなかつた。これに対して、オンラインファジィ軌道計画によるロボットマニピュレータ経路追従制御法を提案している。すなわち、ファジィ推論に基づいて制御しながら、現在のサーボ系の追従誤差を監視するように、経路から軌道を決める方法である。また、デジタル加速度制御法を用いてロボットマニピュレータの経路追従制御のサーボ系を構成し、実験によりオンラインファジィ軌道計画による経路追従制御の有効性を明らかにしている。

(2) 高速・高精度の経路追従制御の目的を達成するために、アクチュエータの制御にはアナログ制御ではなく、デジタルサーボあるいはソフトウェアサーボを用いる必要がある。したがって、ロボットマニピュレータのダイナミクスを考慮に入れたデジタル制御則の系統的な設計法を開発する必要があると考えている。このことにより、本研究においてはメカニカルシステムの運動の本質に注目して、特に、外力と加速度との瞬間的關係を利用することにより、ロボットマニピュレータの経路追従制御のためのデジタル加速度制御法を提案している。また、線系メカニカルシステムにしても、非線形メカニカルシステムにしてもそのシステムの運動の様子は加速度によって決められ、モデル化できない各種の摩擦を含む非線形メカニカルシステムの目標値追従制御の場合、メカニカルシステムの加速度情報を適切に利用すればデジタル制御系を構成できる、ということを示した。さらに、デジタル加速度制御法と従来から良く知られている計算トルク法との違いについても理論的に論じた。実験によりこのデジタル加速度制御法の有効性を明らかにした。ロボットマニピュレータの経路追従制御においては、目標軌道が運動

の前に計画されて利用できる場合が多いが、これまで軌道の未来情報を利用するということはあまり積極的に議論されていない。しかし、目標軌道の未来情報を利用することにより、自動車の運転と同じ理由で、軌道追従制御性能を改善させることが可能である。したがって、本研究では、デジタル加速度制御法に基づく予見制御系を構成した。この予見制御法はモデル化できない各種の摩擦を含むロボットマニピュレータの経路追従制御に適用できるものとなっている。シミュレーションと実験を通じてデジタル加速度制御法のみで構成したサーボ系の過渡特性を改善することができることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、ロボットマニピュレータの運動制御に関して新しい知見を提供するとともに、ロボット工学に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。