

学位論文題名

ロボットマニピュレータの予見制御に関する研究

学位論文内容の要旨

現在、多くの生産現場では、マニピュレータに代表されるロボットを活用して種々の製品が作られ、ロボットの動作そのものが新たな価値の創造に大きく貢献している。ここでは、生産性の向上という観点から、ロボットを効率的に(高速に)かつ思いどおりに(高精度に)、さらに消費エネルギーを抑えて動かすことが、ますます強く要求されている。本研究論文は、ロボットマニピュレータの動作指令は制御以前に予めわかっているという動作状況に着目して、動作指令の未来情報を有効に利用(予見)することによって制御性能を向上するといった従来法にはない特長をもつ制御アルゴリズムを提案するものである。

これまで、ロボットを制御するための種々の制御アルゴリズムが提案されているが、それらのほとんどはフィードバック制御だけを行う方法である。これは現在時刻における目標動作指令と実際に制御して得た動作結果とを比較(フィードバック)することでより良い制御を実現しようとするものである。この方式の利点は、常時目標と結果を比較して制御の決定に反映させているので、ロボットが荷物を持ったり降ろしたりして環境が変化した場合でも、ある程度それに惑わされることなく目標の動作をさせることが可能となることである。しかしながら、ロボットの動作効率を向上させようと、より高速の動作を要求していくと、この方法では現在時刻という一時点だけに着目して制御を決定しようとするため、各時刻において制御誤差を評価しきれなくなり動作が遅れてしまい大きな加速度を必要とし、その結果、機械系に大きな振動が発生して十分な動作精度を得ることができなくなる。つまり、フィードバック制御だけでは、動作の高速性と高精度性の両立という点において原理的な限界が存在する。

そこで、目標とする動作指令の未来情報を有効に利用することによって制御性能の改善を図る次のような予見制御の考え方に基づいて、上記のフィードバック制御の欠点を克服し、より高速・高精度のロボット制御を実現しようというのが本研究の趣旨である。予見制御は、我々が車を運転する場合を例にすると、次のような考え方である。運転者は常に前方を注視し、前方の道路が直線なのか曲線なのか、曲がっている場合どれくらいの曲がり方なのかといった先の情報を取り込むことで、道路からはみ出ないように安全に走行するための適切な速度やハンドル操作を時々刻々判断し難なく運転している。また、運転手は車酔いはしないがそれ以外の同乗者は酔うということがあるが、これも今後の行動を予見できる立場にいる者の優位さの現れと考えられる。さらに、日常生活においても、天気予報、株価の予測など、先を見て先を予測した上での行動の有効性や必要性を我々は痛切に感じている。予見制御とは、このようにふだん我々がやっている予見・予測に関する行動様式を制御工学の領域に取り入れたものである。

本論文は、この予見制御の考え方をロボットマニピュレータの動作制御に取り入れた制御法について述べるものであるが、具体的に以下のような3つの方法を提案している。第1に、空間内の連続曲線にロボットを追従させることを目的とする経路制御問題に対して、経

路の未来情報を効率的に利用するために面積誤差評価予見制御法を提案する。一般的な予見制御法では、目標指令値と制御量との差を評価する立場をとっている。ロボットの経路制御において考えると、この立場は各時刻における目標経路と追従経路間の誤差すなわち位置誤差を小さくする努力することを意味している。このような位置誤差評価の考え方では、とくに高速な経路制御が要求される場合には、制御誤差を評価しきれなくなり、機械系に振動などの負担が生じて十分な制御性能を得ることが困難であった。そのため、新しい誤差評価指標として目標経路と追従経路間に生ずる誤差領域の面積に着目し、これを面積誤差と呼び位置誤差と共に評価することによって制御性能を向上させようというのが面積誤差評価予見制御法の基本的考え方である。実際の制御系設計については、未来情報を利用する予見フィードフォワード制御部と制御対象の不確定性に有効なフィードバック制御部を合わせ持つように制御系を構成し、制御対象の不確定性を持続外乱として捉え最適1型サーボ系設計を行うことにより制御系に定常ロバスト性を持たせる方法について述べている。本方法は、制御対象の変動に対して有効であることを確認した。一方、この面積誤差評価予見制御法は、線形最適制御理論の枠組みで定式化しているの、マニピュレータのように非線形性の強いロボットにはそのまま適用することができない。そこで、本論文では、第2に、マニピュレータの非線形ダイナミクスをモデル化する方法を提案し、それを用いて非線形補償し制御を実行する方法について述べる。モデル化は、非線形関数近似のための多層型ニューラルネットワークの学習により実現した。従来の直接逆モデル学習法が運動方程式に基づいて定式化されているため学習に位置、速度と共に加速度が必要となるが、現在は加速度を正確に計測することが難しく問題であった。本論文では、マニピュレータの運動因果関係を運動方程式ではなくその積分形で加速度に依存しない運動量変化関係式に基づいてモデル化することで、原理的に位置と速度だけを用いて逆モデル学習が可能となる方法を示した。本アルゴリズムはマニピュレータの全ての項をモデル化するため計算量が大きくオフライン向きである。一方、マニピュレータのモデルが制御時に大きく変動する場合には、オンラインでモデル計算することが必要となる。上記のアルゴリズムを普通のシグナルプロセッサで実現することは難しく、より簡単なアルゴリズムで一般的なロボットに適用できる方法の開発が望まれる。そこで、本論文では、第3に、ロボットの運動過程に注目することによって慣性項以外の非線形項のモデル化を不要とする非線形予見制御法を提案する。一般に、マニピュレータの非線形ダイナミクスは、慣性項とそれ以外の非線形項の和として表わされる。慣性項はマニピュレータの重量と寸法が決まればモデル化できるが、慣性項以外の非線形項にはモデル化がほとんど不可能な各種の非線形摩擦が含まれる。ここで、マニピュレータの運動過程では、外部入力を印加した瞬間においては加速度だけが変化して、加速度の積分である速度とその積分である位置は瞬間には変化しないといった性質が存在する。本論文では、この物理的性質に着目することによって、マニピュレータの離散時間モデルを慣性項だけの差分方程式として表わせることを示す。さらに、このモデルに基づいて、慣性項だけを用いた非線形補償による線形化+予見制御則の形で、マニピュレータに対する予見制御系を設計することが可能となることを示す。本方法は、原理的に慣性項以外の非線形項が未知であってもよく、それら非線形項の計算が必要ないので、アルゴリズムが非常に簡単である。本方法をマニピュレータ実機に適用し、本方法が実用面で有効であることを確認した。

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 脩

学 位 論 文 題 名

ロボットマニピュレータの予見制御に関する研究

近年、多くの生産現場では、生産性や加工精度の向上といった観点から、産業用ロボットマニピュレータをより効率的かつ思いどおりに動かすことがますます強く要求されており、ロボットマニピュレータの高速・高精度制御に関する研究が盛んに行われている。現在実用化されている制御方式の多くは、現在時刻一時点だけに着目した制御方式を採用しているため、高速動作時に非常に急激な駆動入力が必要となって機械系に大きな振動を発生させてしまい十分な動作精度を得ることができなくなるといった原理的な限界が存在する。したがって、動作のさらなる高速化・高精度化を図るために、より滑らかな駆動入力によって機械系の振動を抑えることができる新しい原理に基づく制御方式の開発が期待されている。

本論文は、このような現況にあるロボットマニピュレータの動作制御において、ロボットマニピュレータの動作指令が制御以前に予めわかっていることに着目して、動作指令の未来情報を有効に利用することによって、より高速・高精度の動作制御を実現することを目指したロボットマニピュレータの予見制御方式について論じたものであり、未来予見という新しい考え方がロボットマニピュレータ動作の高速化・高精度化に有効であることを理論面および実用面から明らかにしている。従来方式は、基本的に現在時刻一時点だけに着目したフィードバック制御方式であり、常時目標と結果を比較して制御の決定に反映させているため、環境が変化した場合でもある程度目標の動作をさせることができる利点を持つ。しかし、より高速の動作を要求していくと、各時刻で制御誤差を評価しきれなくなり動作が遅れて大きな加速度を必要とし、その結果、機械系に大きな振動が発生して十分な動作精度を得ることができなくなるといった原理的な限界が存在する。

そこで、目標とする動作指令の未来情報を有効に利用することによって制御性能の改善を図る予見制御の考え方に基づいて、上記のフィードバック制御の欠点を克服し、より高速・高精度のロボットマニピュレータ制御を実現しようというのが本論文の趣旨である。予見制御は、普段我々が行っている予見・予測に関する行動様式を制御工学の領域に取り入れたものであり、目標値追従特性の改善や制御入力波形の平滑化などの長が理論的に明らかにされている。本論文は、この予見制御の考え方に基づくロボットマニピュレータの動作制御法を以下の3つの観点から提案している。

第1に、空間連続曲線に追従させることを目的とした経路制御問題に対して、経路の未来情報を効率的に利用するための面積誤差評価予見制御法を提案している。一般的な予見制御法では、目標経路と追従経路間の差である位置誤差を評価する立場をとっているが、高速動作時において制御誤差評価が非効率的であるため十分な制御性能を得ることが困難であった。本論文では、新しく誤差領域の面積に着目して位置誤差と共に評価することで制御性能の向上を図っている。本手

法は、とくに高速性が要求される経路制御問題において有効であると認められる。

第2に、ロボットマニピュレータの非線形ダイナミクスをモデル化し補償するための運動量変化逆モデル学習法を提案している。一般的なロボットマニピュレータは非線形性が強く、線形理論をそのまま適用することができない。本論文では非線形性を多層型ニューラルネットワークの学習によりモデル化し、従来の運動方程式に基づく直接逆モデル学習法では加速度の測定が必要となるのに対して、運動因果関係を運動量変化関係式に基づいて記述することで位置と速度だけを用いた逆モデル学習が可能となっている。本手法は、加速度の測定が困難である現状において有用であると認められる。

第3に、ロボットマニピュレータの運動過程において成立する物理的性質を巧みに利用することによって、慣性項モデルだけを用いた簡単なアルゴリズムで実現できる一般的なロボットマニピュレータに対する予見制御法を提案している。本手法の理論的な有効性は数値計算で検証され、ロボットマニピュレータ実機に適用して実験を行い、実用面で有効な制御であることが確認されている。本手法は、モデル化のほとんど不可能な慣性項以外の非線形項が原理的に未知でよく、とくに実用的であると認められる。

これを要するに、著者は、ロボットマニピュレータの動作制御に予見制御の考え方を取り入れることによって、これまで得ることが難しかった制御特性を実現可能とし、産業応用上有益な知見を得たものであり、ロボット制御工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。