

## 学位論文題名

# Controller Design Considering Nonlinearity of Flexible Robotic Manipulator under Fast Motion

(高速駆動されるロボットマニピュレータの非線形性を考慮した制御系設計)

## 学位論文内容の要旨

Control tasks of flexible robotic manipulators involve problems on accurate position and vibration suppression. The flexible robotic manipulator has fewer actuators than the degrees of freedom to be controlled; it is a challenging work to obtain the control purposes compared with the existing rigid robotic manipulators. The scheme of the controller is chosen on the basis of the dynamic model and vibration analysis, so the modeling and vibration analysis are the prerequisite for the controller design. Additionally, an experiment and simulation are required to verify the proposed controller.

This dissertation deals with the controller design for a flexible robotic manipulator, consisting of the three tasks listed as follows: Firstly, the modeling and vibration analysis of the flexible robotic manipulator are investigated by considering the bending mechanism of a flexible beam exactly. The effect of gravity is considered in the modeling, and the effect of joint flexibility is considered in the vibration analysis. Secondly, a control scheme is proposed to design the controller of the flexible robotic manipulator based on the modeling and vibration analysis. Finally, the simulation and experiment are carried out to validate the theoretical derivation and determine the parameters of the proposed controller.

In order to achieve the above control tasks, this thesis is organized in the following five chapters:

The research background about the flexible robotic manipulator was introduced in chapter 1. The tasks of this work were presented and the brief outlines of this research were provided in this chapter.

In chapter 2, a new description of elastic deformation was presented and a comparison between the conventional description and the new description of deformation was studied. The comparison result implies that the new description is valid to calculate the flexible displacement in the case of fast motion. A definition about the fast motion was presented to denote the scope of application. The new description of elastic deformation on the flexible beam and Hamilton's principle were used to derive the dynamic model of the flexible robotic manipulator. A forced vibration method was applied to evaluate the characteristics of flexible vibration. In this research, the vibration analyses based on two strategies were applied to analyze the flexible dynamics. In the first strategy (AIM, angle independent method), angles of joints are assumed to be independent of the external forces. In the second strategy (ADM, angle dependent method), the effect on the angular functions of joints is considered due to the

external forces. On the basis of the vibration analyses, the following results are derived: the nonlinear dynamic model includes more dynamic stiffness than the simplified model; and the inversion of the inertia matrix of system dynamics is not globally stable, possibly a singular problem.

To avoid the singularity, the system dynamics was decomposed into two subsystems. Based on the decomposition, a decomposed dynamics control (DDC) was proposed to design a controller for a flexible robotic manipulator in chapter 3. The DDC is composed of a flexible dynamic control module and a rigid dynamic control module. The flexible dynamic control module involves developing a desired trajectory through the considerations of the physical properties of the device based on a feed-forward strategy; the rigid dynamic control module aims at tracking the desired trajectory and further suppression of flexible vibration based on a feedback strategy. On the flexible dynamic control module, a comparison between an input shaping technique (IST) and an optimization was studied. The optimization can completely reduce the residual vibration by virtue of considering the whole flexible dynamics rather than the partial consideration of flexible dynamics for the IST. Additionally, the optimization is sensitive to the accuracy of the dynamic model, so the rigid dynamic control module was adopted to compensate for the disadvantage.

In chapter 4, A Nelder-Mead simplex (NM) algorithm was applied in the optimization calculation to determine the desired trajectory. The calculation results revealed that the optimization could be employed for the extremely nonlinear problems. On the basis of the calculation results, a one-link experiment and a two-link experiment were implemented to evaluate the tracking performance for the desired trajectories and original trajectories. The experimental results imply that the optimization is strongly dependent on the accuracy of the system dynamics, and that the hybrid sliding mode control (HySMC) not only tracks the desired trajectory but also compensates for the shortage of the optimization. Experimental results verified the validity of the proposed scheme.

Finally, the conclusions of the whole work are described and the further works are presented in chapter 5.

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 林 幸 徳

副 査 教 授 梶 原 逸 朗

副 査 教 授 成 田 吉 弘

副 査 教 授 金 子 俊 一 (情報科学研究科)

## 学 位 論 文 題 名

# Controller Design Considering Nonlinearity of Flexible Robotic Manipulator under Fast Motion

(高速駆動されるロボットマニピュレータの非線形性を考慮した制御系設計)

柔軟ロボットマニピュレータの制御においては、高精度の位置決めと高い振動抑制性能の達成が求められる。柔軟ロボットマニピュレータは、制御すべき自由度に対して利用可能なアクチュエータ数が少ないため、剛体ロボット系に比べて目標達成は容易ではない。また、高速駆動される場合は大きな曲げ変形が生じ、従来用いられる微小変形に基づく力学モデルでは、その変形を正確には表現できない。制御系設計は力学モデルの構築とその振動解析に基づいて行われるため、新たな力学モデルの導入が必要である。さらに、残留振動を抑制する方法としては、入力整形によるフィードフォワード制御や最適フィードバック制御系の適用が必要となる。ここでも、入力整形のための目標軌道の設計やモデル化誤差にロバストな制御系設計が望まれる。

本研究では、高速駆動される柔軟ロボットマニピュレータのモデリングと制御系設計を、以下の順に論じている。まず、マニピュレータの曲げ変形を正確に表現できる位置ベクトルを導入するとともに重力を考慮して支配方程式を導出し、振動解析によって妥当性を検証している。次に、最適化手法を用いた目標軌道設計ならびにスライディングモードに基づく制御系設計を行った。最後に、1リンクおよび2リンクマニピュレータに関するシミュレーションと実験を実施して提案手法の有用性を検証している。

本論文は5章で構成されており各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、柔軟ロボットマニピュレータに関する研究背景とこれまでの研究、さらに本研究の目的と概要を述べている。

第2章では、モデリングと振動解析について述べている。まず柔軟ロボットマニピュレータの曲げ変形を正確に表現する手法を導入し、1リンクおよび2リンクマニピュレータの力学モデルを導出している。本論文では弾性振動の解析を以下の二つの方法に基づいて行っている。一つは Angle Independent 法であり、関節角度を外力とは独立に仮定する手法である。もう一つの方法は、Angle

Dependent 法であり、外力が関節の角度関数に与える影響を考慮する方法である。振動解析の結果、非線形力学モデルは簡略化モデルよりも動的剛性が高いこと、システムの慣性行列の逆行列が特異となる可能性のあることを明らかにしている。

第 3 章では、制御系設計について述べている。まず特異性を回避するために、システムの力学モデルを柔軟サブシステムと剛体サブシステムに分ける手法を導入し、さらに制御手法として DDC (Decomposed Dynamics Control) を提案している。DDC は柔軟サブシステムに関する制御モジュールと剛体サブシステムに関する制御モジュールからなる。柔軟サブシステムに関するモジュールは、目標軌道設計によるフィードフォワード制御であり、入力整形法 (IST) と最適化による方法の比較を行なっている。剛体サブシステムに関するモジュールでは、ハイブリッドスライディングモード制御 (HySMC) を提案している。シミュレーションの結果、IST に比べて最適化による方法では、残留振動をほぼ完全に抑制できることを示した。しかし、最適化による方法は力学モデルの精度に敏感であるため、剛体サブシステムに関する制御モジュールによる補償を加えることで、ロバスト性能が改善できることを示している。

第 4 章では、提案手法に基づくシミュレーションと実験について述べている。シミュレーションでは、最適化した目標軌道により残留振動を効果的に抑制できることを示した。実験は 1 リンクおよび 2 リンクマニピュレータを対象に、重力の影響を明らかにできる最終姿勢と目標軌道に対して実施している。実験においては、最適化された目標軌道を用いてもモデル化誤差の影響により残留振動を完全には抑制できないことが確認された。しかし、HySMC は目標軌道追従性能に優れているのみではなく、より高い残留振動抑制性能を示し、最適化手法の欠点を補う特性を有することを検証している。

第 5 章は結論であり、本研究で得られた成果を総括するとともに今後の研究を展望している。これを要するに、著者は柔軟ロボットマニピュレータの新たな力学モデリングを提案するとともに、特異性を回避する解析手法を提案した。さらに、残留振動を生じない目標軌道の生成に独自の最適化手法を導入するとともに、高いロバスト性能実現のためにハイブリッドスライディングモード制御を導入した。そして、シミュレーションと実験によって提案手法の有用性に関して有益な知見を得たものであり、機械工学の進歩に貢献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。