

(第6号様式)

## 学位論文審査の結果の要旨

氏名	ABDUL KADIR MUHAMMAD (アブドゥル・カデイル・ムハンマド)
審査委員	主査 岡本 伸吾 副査 柴田 論 副査 保田 和則

### 論文名

Finite Element Analysis and Experiments on Vibration Control of Flexible Manipulators  
Using Piezoelectric Actuators

(圧電アクチュエータを用いた柔軟マニピュレータの振動制御に関する有限要素解析と実験)

### 審査結果の要旨

本論文は、Chapter 1 から Chapter 6 までで構成されている。

Chapter 1 (Introduction) では、論文の背景と目的が述べられている。地上で使用されている産業ロボットのようなロボット・アームは、把持する物体の重量によるアームの変形および動作時に発生する振動を避けるために、アームは重厚な造りをしている。一方、宇宙空間における宇宙ステーションやスペース・シャトル等で使用されるロボット・アームは、重力の影響を受けないので、アームは重厚である必要はなく、むしろ軽量であることが求められる。しかし、アームが軽量化される場合は、アームの剛性が低下し、アームが変形するので動作時に振動が発生する。また宇宙空間で発生した振動は、減衰するのに長時間を要する。

まず、本研究でターゲットとしている柔軟マニピュレータの振動制御に関する文献調査を行い、本研究のように、(1)解析手法としては有限要素法を用い独自の計算コースを開発する、(2)アクチュエータとしては圧電アクチュエータを使用する、(3)制御方法としては、ロバスト制御の一種である AF(アクティブ・フォース)制御を使用する等の特徴を有する研究が過去に実施されていないことを示すことによって、本研究の新規性および意義が述べられている。

Chapter 2 (Formulation and Computational Simulations on Vibration Controls of a Flexible Single-link Manipulator Using Finite Element Method)では、有限要素法を用いて、柔軟なリンクからなる Single-link Manipulator が動作している時の動力学計算および振動制御計算を行うことができるような運動方程式を導出し、(1)時刻歴応答計算、(2)フーリエ変換、(3)固有値計算(固有振動数&固有振動モード)、(4)振動制御計算、の計算コードを開発した。制御手法としては、古典制御としては、P(比例)制御、PD(比例・微分)制御、PID(比例・微分・積分)、ロバスト制御としては、AF(アクティブ・フォース)制御が行えるようになっている。また、制御力を発生するアクチュエータとしては、圧電アクチュエータを使用できるようになっている。開発したコードを用いて、柔軟な Single-link Manipulator の振動制御計算を行うことによって、AF(アクティブ・フォース)制御が有効であることが示されている。

Chapter 3 (Experiments on Vibration Controls of a Flexible Single-link Manipulator Using Finite Element Method)では、Chapter 2 で述べられた定式化および開発した計算コードの妥当性を調べるために、柔軟な Single-link Manipulator の実験装置を開発し、実験を行い、実験結果と計算結果とが良く一致することを示し、柔軟な Single-link Manipulator に関する計算コードの妥当性が示されている。

Chapter 4 (Formulation and Computational Simulations on Vibration Controls of a Flexible Two-link Manipulator Using Finite Element Method)では、有限要素法を用いて、柔軟なリンクからなる Two-link Manipulator が動作している時の動力学計算および振動制御計算を行うことができるような運動方程式を導出し、Single-link Manipulator と同様に、4 種類の計算コードを開発した。柔軟な Two-link Manipulator についても、AF(アクティブ・フォース)制御の有効性が示されている。ただし、Two-link のようにリンクの数が増えると、スパル・オーバ問題が発生するので、アクチュエータの数を増やす等によって、制御方法をより最適化する必要があることが述べられている。

Chapter 5 (Experiments on Vibration Controls of a Flexible Two-link Manipulator Using Finite Element Method)では、Chapter 4 で述べられた定式化および開発した計算コードの妥当性を調べるために、柔軟な Two-link Manipulator の実験装置を開発し、実験を行い、実験結果と計算結果とが一致することを示し、柔軟なシングル・リンク・マニピュレータに関する計算コードの妥当性が示されている。

Chapter 6 (Conclusions)では、本論文の総括を行っている。

上記の学位論文は、学術的に優れた内容であることと、その内容については、既に、3 件の査読付き国際ジャーナル、3 件の国際会議論文(査読付き Full Paper)、2 件の国内会議プロシーディング、および 1 件の著書(分担)として公表されている。さらに、1 件の賞「Best Student Paper Award」(国際会議、The 2014 IAENG International Conference on Control and Automation)を受賞している。また、本論文の内容は、柔軟マニピュレータの設計に対して、工学的に有用な知見を提供しており、博士(工学)の学位論文として価値のあるものと認められる。