

氏名	KIM SUNGYEUP		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第10260号		
学位授与年月日	令和4年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	強制加振される弦に生じる空間運動とその制御		
主査	筑波大学 教授	工学博士	藪野 浩司
副査	筑波大学 教授	博士(情報科学)	望山 洋
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	河合 新
副査	慶應義塾大学 教授	工学博士	杉浦 壽彦

論文の要旨

本論文は、一端を周期的に加振される弦に発生する空間運動の解析とその面内運動への安定化法に関するものである。高機能・高性能化が要求される中で、広く機械システムの軽薄短小化が進み、連続体としてのモデル化の必要性が増すとともに、分布定数系に発生する非線形現象の解析やその制御法に関する研究への期待が大きくなっている。このような状況に鑑み、本研究では、分布定数系の最も基本的なシステムの一つとして弦を取り上げ、それに生じる非線形共振現象の特性解析による発生メカニズムの数理的解明、さらにその安定化制御法の構築を理論的ならびに実験的に行っている。具体的な研究内容は以下に示すとおりである。

まず、弦の空間運動を解析するためには、従来研究では一般に無視されてきた弦の伸びによって生じる復元力の非線形成分を考慮することが必須であることを指摘し、3次の幾何学的非線形性を考慮した運動方程式を導出している。境界条件には周期的な加振変位が考慮されており、加振周波数が、弦の線形固有周波数に近い場合に生じる共振現象の解析が行われた。多重尺度法を用いて、平均化方程式を導出し、定常振幅の安定性および分岐点を明らかにしている。その結果から、自明な定常振幅の不安定化と同時に、加振と直交方向に非自明で安定な定常振幅が発生することを見出し、弦が空間運動するメカニズムを数理的に明らかにしている。さらに、加振と直交方向の変位をフィードバック制御で与えることにより、共振点付近で発生する空間運動を面内運動に安定化制御する方法を振幅方程式から理論的に導いている。端点が加振される弦に関する模型実験装置を製作し、実験的にパラメータスタディーを行い、理論的に明らかにされた弦の空間運動およびその制御法について、妥当性を確認している。

審査の要旨

【批評】

弦に生じる振動は、分布定数系のダイナミクスの代表例として、古くから注目され研究されてきた。近年、機械システムへの高機能・高性能化の要求の高まりから軽薄短小化が進み、剛体近似モデルによって機械システムのダイナミクスを捉えることが困難になり、連続体近似モデルが広く使われるようになってきた。従って連続体の代表例である弦のダイナミクスについて、その非線形性を考慮に入れた詳細な解析を行い、様々な非線形現象の発生メカニズムを数理的に明らかにし、その安定化法を提案することは、非常にタイムリーかつ重要なテーマである。

弦の振動はある一方向に加振力が加わった場合でも、その弾性特性と断面形状が等方的であるため、弦楽器の弦のように回転運動を容易に発生することが実験から知られている。しかしながら、その物理的な発生メカニズムを明らかにするためには、加振方向を含む平面内での振動（面内振動）とその平面と直交する面内での振動（面外振動）との非線形連成を考慮した非線形解析が必須となる。このことは一部の非線形解析の専門家の間では知られていたが、その詳細を実験結果とともに明らかにした例はこれまで見当たらず、また共振点付近で発生する回転運動の制御法に関する提案も全く行われていない。本研究において得られた、弦に発生する非線形共振のメカニズムや共振現象の安定化法は、他の連続体にも適用可能な普遍的なものであり、その成果は大いに評価できる。研究のより詳細な部分に関する批評を以下に示す。

まず、弦に発生する回転運動の発生を解析的にそのメカニズムを明らかにした点がユニークである。すなわち多重尺度法で得られる振幅方程式から求まる定常振幅の分岐点を詳細に検討し、回転運動の発生が面外運動の分岐から発生することを理論的に明らかにしたことは、特筆すべき点である。

次に得られた回転運動の発生メカニズムをもとに回転運動の発生要因を直接除去するフィードバック制御法を考案している。同方法では、フィードバックゲインの物理的な裏付けが明確であり、連続体の非線形振動の安定化に関する一つの形を示しており、汎用的かつ重要な方法論を提示している点が評価できる。

さらに、一般にシステムに含まれる非線形性は小さく、非線形現象における理論と実験との定量的比較が困難な中で、非線形共振現象の特性および提案した制御法の性能評価が実験結果との比較により定量的に行われ、それらの妥当性が示されていることは、高く評価できる。

【最終試験の結果】

令和4年1月27日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。