



Title	ソフトアクチュエータを応用した構造加振/振動制御技術の構築 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	比留田, 稔樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14877号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85316
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Toshiki_Hiruta_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 比留田 稔樹

学位論文題名

ソフトアクチュエータを応用した構造加振/振動制御技術の構築
(Novel Application of Soft Actuators to Vibration Excitation and Vibration Control)

機械構造物が有する諸問題を解決するための振動抑制技術が数多く開発されており、目的に応じた様々な振動制御手法がこれまでに提案されている。その中でもアクティブ制振技術は対象構造物に生じた有害な振動に対して、制振用アクチュエータによる発生力を利用することにより大きな制振効果を発揮する。この制御手法はこれまで多くの機械構造物への適用が検討されてきたが、制振用アクチュエータを柔軟かつ軽量の特性を有するソフトアクチュエータとすることにより、従来のアクチュエータでは実現が難しかった構造物の振動制御が可能となる。特に、柔軟構造物や曲面構造物に対して、従来では成し遂げられなかった性能向上や長寿命化に貢献することが期待できる。

一方で、ソフトアクチュエータを振動子として扱うことにより対象に加振力を与えることができ、新たな振動計測技術を提案することが可能となる。振動計測技術は現在、機械構造物の動特性評価をはじめ損傷検知技術や締結部分の緩み検知などに応用されているが、この技術は工業のみならず農業にも応用されている。農業生産の分野において、青果物の品質を機械的に測定する技術の一つに振動計測が用いられている。これに用いる振動試験装置にソフトアクチュエータを適用することで、装置の小型化や持ち運びなどの意味でその利便性が向上することが期待できる。

以上のような研究背景から本研究では、ソフトアクチュエータを適用した振動制御技術および振動計測技術を提案する。振動制御においては、柔軟構造物である膜構造の振動制御および曲面構造物であるパイプ構造を対象としたアクティブ制振を行う。振動計測においてはソフトアクチュエータ加振に基づく振動試験を農業の分野に応用することを提案し、青果物の品質評価を行う。

膜構造の振動制御においては、ソフトアクチュエータであるポリフッ化ビニリデン (Polyvinylidene difluoride: PVDF) フィルムを制振用アクチュエータとしたアクティブ制振を行った。制振効果の検証は振動試験に基づいて遂行した。振動試験において、レーザーブレイクダウン (Laser-induced breakdown: LIB) に基づく非接触レーザー加振法を膜構造への外乱加振として適用することで、再現性の高い振動試験を実現し、高周波における膜構造の周波数スペクトルの評価を可能とした。さらに、非接触で振動が計測できるレーザードップラー振動計 (Laser Doppler vibrometer: LDV) を用いたことにより完全非接触な振動試験システムを実現した。膜構造のアクティブ制振を行うため、対象構造物をモデル化して制御系を設計し、コントローラを H_{∞} 制御理論に基づいて設計した。振動制御実験の結果、膜構造の単一モード制振および複数モード同時制振をそれぞれ実現したことから、提案する PVDF アクチュエータを用いた振動制御は膜構造に対して有効であることが示された。

次に、膜構造の振動制御において誘電エラストマーアクチュエータ (Dielectric elastomer actuator: DEA) を制振用アクチュエータとして適用した。高い伸縮性と応答速度を有する DEA は、膜構造が有する幅広い周波数帯域に存在する共振ピークを抑制することが期待できる。膜構造は宇宙構造物においても用いられていることから、制振効果の検証は大気環境および真空環境における振動試験に基づきそれぞれ遂行した。振動試験において、レーザーアブレーション (Laser ablation: LA) に基

づく非接触レーザー加振法を膜構造への外乱加振として適用することで、真空中においても再現性の高い振動試験を実現し、高周波における膜構造の周波数スペクトルの評価を可能とした。振動制御実験の結果、膜構造が有する共振ピークの応答が低周波から高周波にかけて効果的に抑制されたことを確認した。これより、提案する振動制御手法は大気環境および真空環境の膜構造に対して有効であることが明らかになった。

曲面を有する機械構造物の振動制御を実現するため、DEA を制振用アクチュエータとしたアクティブ制振を適用した。DEA の高い伸縮性は対象の曲面に密着した貼付を可能とし、制振のための発生力を有効に伝達する。振動制御実験における対象は、代表的な曲面構造物であるパイプ構造とした。DEA の寸法およびパイプ構造への貼付位置は、対象の数値解析モデルに基づくひずみエネルギーおよび実験モード解析により得られたモード形状により決定した。パイプ構造のアクティブ制振を行うため、対象構造物をモデル化して制御系を設計し、コントローラを H_{∞} 制御理論に基づいて設計した。パイプ構造の複数モード同時制振を実現すべく振動制御実験を遂行した結果、低次および高次モードにおけるパイプ構造の共振ピークの応答が低減し、1000 Hz 以上の高周波帯域に対しても制振が有効であることが示された。

ソフトアクチュエータを振動制御技術に応用することに加え振動計測技術への応用を検討する。特に DEA を農業分野へ適用することが効果的であると考えられ、本研究では青果物の硬さ評価のための DEA 加振に基づく振動試験手法を提案した。DEA は十分に薄く高い伸縮性を有しているため、曲面や複雑な形状を有する青果物に対しても密着して貼付することができる。DEA を適用した振動試験システムは従来のそれよりも小型化することが可能であり、加振力を対象の青果物に対して有効に伝達することができる。振動試験装置を構築し、対象青果物をりんごおよび洋ナシとして DEA 加振に基づく振動試験を行った結果、明瞭な周波数応答が得られた。共振周波数の値を用いて、青果物の硬さの指標である弾性指標を算出することで貯蔵に伴う硬さの変化を確認した。特に洋ナシにおいては、硬度計により得られた硬さの値と、提案する振動試験によって得られた弾性指標との相関を調査した結果、両者には良好な相関があることが確認された。以上より、青果物の硬さ評価のための DEA 加振に基づく振動試験手法の有効性が示された。

本研究では、ソフトアクチュエータを適用することで、柔軟構造物および曲面構造物の有効なアクティブ制振を実現し、また、青果物の品質評価を小型な振動試験装置により実現した。これらの技術は、将来、様々な応用技術につながると考えられる。膜構造の振動制御においては、ソーラーセイルや宇宙構造物への発展的応用が期待される。ソフトアクチュエータに基づく振動制御は、航空機や車両など、曲面を有する様々な構造物における振動を効果的に抑制できる可能性を有している。また、青果物の品質評価では、提案する小型な装置を自動化することにより、将来における農業の担い手不足などの問題解決に寄与することが期待される。本研究で確立したソフトアクチュエータを応用した構造加振および振動制御技術は、様々な構造やシステムの動特性評価および性能向上を可能とし、システムのさらなる高度化に貢献できると考えられる。