

氏名	Mhia Md. Zaglul Shahadat
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 949 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Optimization of Vibration Control of Six-Degree-of-Freedom Vibration Isolation System (6 自由度除振システムによる振動制御の最適化)
論文審査委員	委員長 教授 水野 毅 委員 教授 高崎 正也 委員 教授 山本 浩 委員 准教授 渡邊 鉄也

論文の内容の要旨

Precision vibration isolation plays an important role for acquiring desired accuracy in many advanced production and measurement industries because many mechanical systems that handle micro and nano-scales in Hi-tech manufacturing processes need to be isolated from surrounding disturbances. Moreover, modern construction vehicles and machineries, usually passive seat suspended, are subjected to self-dislocation at inclined surface which can be retrieved by active seat suspension through the concept of active vibration isolation. During the last three decades, dimension accuracy requirements have progressed from micrometer range to the submicron and even nanometer range in semiconductor industries, micro assembly, aerospace equipment and so on. With regards to these aspects mentioned above, an active precision vibration isolation system was the focus of the present research.

Generally, there are two ways to realize vibration isolation: passive manner, and active manner. Passive vibration isolation systems, consisting mechanical spring and damper, are poor in performance as well as are not suitable for micro and nano-scale industries. In contrast, active systems, in principle, can do work with good performance but they need high-performance sensor such as servo-accelerometer (costly) and actuators with good linearity characteristic. In the present research, an active vibration isolation system was developed which needs solely low-cost displacement sensors. Moreover, voice coil motors, providing sufficient linearity characteristic, were selected as actuators for the developed system. In fact, infinite stiffness against direct disturbance and low stiffness suspension against ground vibration are the two required conditions needed simultaneously to isolate vibration. To obtain these two criteria simultaneously, the developed system was fabricated based on the series combination of two isolators connected with two moving stages, i.e., the developed system is a double-stage active vibration isolation system. In addition, two different control methods: (i) negative stiffness technique and (ii) displacement cancellation technique individually were applied to the developed system and the respective behaviors of the developed system were investigated. It was observed from the experimental results, the system with displacement cancellation technique has good characteristics

to isolate direct disturbance whereas the negative stiffness technique could isolate both disturbances sufficiently but the range of controllability is narrow.

Nevertheless, a limit cycle phenomenon, varying with the variation of the controller parameters, was observed for negative stiffness technique, which usually occurs in a system due to friction nonlinearity. The describing function method was applied to identify this limit cycle theoretically and to establish the relation between limit cycle behaviors and magnitude of controller parameters. The theoretical limit cycle was verified by the experimental limit cycle measured by the time response to the self-oscillation of the system. It is observed from theoretical and experimental analysis regarding nonlinearity due to friction in a negative stiffness control system that higher stiffness and higher damping ratio in design the negative stiffness controller causes the frequency of the induced limit cycle lower.

Furthermore, the transient behaviors often deteriorate the objective function of a vibration isolation system. The unpleasant transient responses against an impulse or a step-wise disturbance are unacceptable in sophisticated micro manufacturing processes. In the current research, to overcome such problems, a feedforward control associated with disturbances was added to the original controller. However, in most cases, disturbances are unpredictable as well as the using of a feedforward control, improving transient responses, is limited. In this research work, to improve the dynamic behaviors independently of the disturbances identified in the system, an acceleration feedback was added with the original controller. MEMS accelerometers were solely used to measure the acceleration; favorably, MEMS accelerometers are low in cost, small in size, and have multi-axis measurement capability. However, the acceleration measured by a MEMS accelerometer carries undesirable noise. To avoid the effect of noise on the acceleration feedback, the acceleration estimated by a kalman filter was used in the previous study instead of direct measured acceleration. Addition of acceleration feedback with original controller improves the dynamic responses of a system independently of the disturbances identified on the system. MEMS accelerometer with Kalman filter algorithm is proposed in this research to deduct the increase of additional cost due to adding of acceleration feedback to the controller.

The zero-power control is one of the means of reducing power consumption by a control system, which behaves like a negative stiffness control and the control current converse to zero at steady-states. On the other hand, the integral control is a common approach for realizing zero-compliance but it accompanies power consumption even in steady-states. Therefore, in a conventional control system, simultaneous zero-power and zero-compliance characteristics are incompatible with each other. A new mechanism is proposed to overcome this difficulty which consists of a zero-power control magnetic suspension system connected with a normal spring (positive stiffness) in series, where the stiffness of the magnetic suspension and the normal spring are equal in absolute magnitude. On the other hand, if an integral control is applied instead of the zero-power control to obtain the proposed mechanism, in principle, it would cause zero compliance independently of equal stiffness, but there is power consumption. By analyzing the cost function, it is found that the optimal control point is an intermediate control between zero-power and integral control for a zero-compliance system.

A multi-DOF control system, using same number of individual local controlled units is proposed to isolate multi-directional disturbances simultaneously in this work as well. There are two different mechanisms for realizing multi-axis-freedom-of-control: suspension mechanism and parallel mechanism. The parallel mechanism is assumed to apply in the current investigation.

論文の審査結果の要旨

本学位論文の審査委員会は2014年2月6日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

最先端の製造システム、精密組立システムや極微小領域計測システムでは、振動などの外乱を除去する除振装置が重要な役割を果たしている。除振装置で除去すべき外乱は、設置床の振動に起因する地動外乱と除振テーブルに直接作用する直動外乱とに大別でき、前者には低剛性、後者には高剛性の支持機構が適している。従来のパッシブな除振装置では、これらの相反する要求を十分に満足することが原理的に困難である。このような問題は、アクティブ制御を導入することによって克服できる。しかしながら、従来のアプローチでは、除振テーブルの振動を検出し、これを抑制するようにアクチュエータを駆動するというフィードバック制御が基本となっているので、振動を低周波まで正確に検出するサーボ形加速度計のような高性能なセンサを用いる必要があった。このことは、アクティブ除振装置の高コスト化の大きな要因となっていた。このような問題に対して、ゼロパワー制御を施した磁気浮上系（ゼロパワー磁気浮上機構）が負の剛性を持っていることを利用して、これと正の剛性を持つ支持機構とを中間質量を介して直列に接続することによって、振動絶縁性能を損なうことなく、直動外乱に対する剛性を無限大とする除振装置が提案されている。本研究では、この方法を水平方向3自由度をアクティブ除振装置に適用すると共に、類似した特性を変位相殺制御を用いて実現し、両者の性能について比較している。また、負の剛性を持つ支持機構は、摩擦の影響によって自励振動を生じることを見出し、それについて記述関数法に基づく理論解析を行っている。一方、提案されている方式の除振装置の過渡特性を改善するために、フィードフォワード制御や、低コストなMEMS形加速度センサの出力に基づく加速度フィードバックを導入することを提案し、実験によってその有効性を示している。さらに、パッシブな支持機構とアクティブな支持機構とを直列に接続した支持機構の最適化問題について取り組んでいる。

本学位論文は、以下の11章からなる。

第1章は、序章であり、研究の背景、既存の研究の動向、基本的な着想、本論文の目的および本論文の概要について説明している。

第2章では、本研究で対象とした水平3自由度アクティブ除振装置について述べている。実験装置は、除振テーブル、中間質量、ベース、中間質量から防振テーブルを駆動する4台のボイスコイルモータ（VCM）、ベースから中間質量を駆動する4台のVCMから構成されている。基本的には、前者のVCMによって負の剛性を持つ支持機構を、後者のVCMによって正の剛性を持つ支持機構を実現するが、逆の組み合わせや変位相殺制御も実現できるようになっている。除振テーブルおよび中間質量は、水平全方向へ自由に運動できるように、免震装置などに用いられているボールガイドで支持されている。

第3章では、水平3自由度アクティブ除振装置の数学モデル化、これに基づく制御系設計および理論・実験の両面から制御系の性能評価が行われている。具体的には、直動外乱に対して無限大の剛性を実現するために、負の剛性を用いる方法と変位相殺制御を用いる方法とが示され、両者の性能が比較されている。その中で、負の剛性を持つ支持機構の問題の一つとして、ボールガイド部の摩擦の影響によって自励振動が生じることが指摘されている。

第4章では、第3章で示された自励振動について、記述関数法に基づく理論解析を行っている。解析の結果は、実験の結果と良く一致しており、解析方法の有効性が示されている。

第5章では、動的な直動外乱に対する過渡応答を改善するために、フィードフォワード補償の導入が検討されている。最初に、負の剛性を持つ支持機構を利用した除振装置に対するフィードフォワード補償入力の形が導かれ、ステップ応答および周波数応答の両面からその有効性を示している。つぎに変位相殺制御を利用した除振装置についても同様にフィードフォワード補償入力の形が示され、実験によってその有効性が実証されている。

第6章では、外乱が未知の場合に、加速度フィードバックを用いることによって動特性を改善する方法が示されている。これについても、負の剛性を利用する除振装置と変位相殺制御を利用する除振装置の両者について検討されている。実験によって、加速度フィードバックによって、共振点付近での振動が抑制できることが示されている。一方で、加速度フィードバックを導入することの問題として、低周波の加速度を検出するには高コストなサーボ形加速度センサが必要となることが指摘され、この問題を解決するためにMEMS形加速度センサを代用することが提案されている。その場合の問題は、後者では観測雑音が大きく低周波の加速度検出が難しいことが指摘されている。

第7章では、前述した問題を解決するために、カルマンフィルタを用いて加速度信号を推定することが提案され、実際にMEMS形加速度センサを用いた場合でも、サーボ形加速度センサを用いた場合と同様な性能が得られることが示されている。

第8章では、ゼロパワー制御を利用した除振について、改めて現代制御論の立場から、解析が行われている。

第9章では、ゼロパワー特性とゼロコンプライアンス特性を両立する方法として、負の剛性を持つ支持機構と正の剛性を持つ支持機構とを直列に接続する機構が見直され、両者の剛性の絶対値が一致しない場合の最適化問題について議論がされている。

第10章では、パラレルメカニズムを利用した6自由度アクティブ除振装置に、これまでに開発した制御方法を適用する試みについて述べられている。

第11章では、一連の研究の成果がまとめられている。

以上のように、本研究はゼロコンプライアンス機構を利用した除振装置の実用化に不可欠な有用な知見を数多く得ている。また、本学位論文の第3章の主要部分は、Journal of System Design and Dynamicsに掲載されており、第4章の主要部分は国際的学術雑誌であるIEEE Transaction on Control System Technologyに掲載予定であり、第5章の主要部分は日本AEM学会誌に掲載されている(いずれも第1著者)。加えて、フルペーパーによる査読のある国際会議会議録に4編が掲載されている。さらに、第6章・第7章の主要な部分については、ASME Transaction on Dynamic System, Measurement and Controlに投稿済みである。

これらのことから、本学位論文審査会は、本学位論文が博士(学術)の学位にふさわしいものであると判断し、全員一致で合格と判定した。