

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03935

研究課題名(和文)超小型動的機械システムの基本特性と振動制御手法の開発

研究課題名(英文)Dynamic characteristics of a micro mass-spring vibration system and its vibration control

研究代表者

森下 信(Morishita, Shin)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：80166404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では線径20ミクロン、直径数百ミクロンの超小型ばねと錘を用いて振動系を構築し、動的特性を実験的に検討した。また、空気抵抗の影響を実験的に明らかにし、制振方法として可変減衰の付与方法について検討した。さらに、群知能を用いた振動抑制システムの可能性について検討を行った。その結果、センサとアクチュエータからなる複数のユニットを結合するネットワーク上に構成した群知能が、振動を抑制する可能性があることをシミュレーションによって示した。

研究成果の概要(英文)：A micro mass-spring vibration system was constructed and experiments were conducted. The wire diameter of coil spring is twenty micrometers and the diameter was several hundreds micrometers. The weight of mass was several milligrams. As a result, it was shown that Newtonian dynamics is still valid for the system of this size. It was also discussed on the damping effect caused by the air resistance. Furthermore, the swarm intelligence has been applied to a vibration control system. A number of units composed of a sensor and an actuator were distributed on the system, and each unit was connected to each other to exchange the information of state variables sensed by each unit. A lumped mass system with five degree-of-freedom was prepared as the mechanical system in this simulation, and a variable damper was assumed as actuator on each unit. The result showed that the excited vibration was reduced autonomously by the swarm intelligence configured on the network of units.

研究分野：機械力学

キーワード：動的設計 超小型ばね マイクロマシン 振動制御 MRグリース

1. 研究開始当初の背景

我が国では科学技術政策として、特に過去10年にわたり、ナノテクノロジーを含むマイクロテクノロジー関連研究を重要視してきた。平成18年度に制定された第3期科学技術基本計画でも重点推進4分野のひとつとして「ナノテクノロジー・材料」を取り上げ、また推進分野として「ものづくり技術」の強化を掲げている。さらに平成23年8月に閣議決定された第4期科学技術基本計画においては科学技術の基本基盤の充実、強化として先端計測や解析技術等の発展につながるナノテクノロジーを含む領域横断的な科学技術の強化を重要課題として設定している。また、平成25年6月の産業競争力会議の成長戦略素案では、「新たなフロンティアを作り出し、イノベーション戦略と国際展開戦略を抜本的に強化し」と示されたように、技術革新の重要性が謳われている。国内では経済産業省が実施したマイクロマシン研究開発プロジェクトに対しても、産業構造審議会による評価が行われ、その中で技術戦略、人材育成、経済効果への影響の大きさは高く評価されている。

以上の施策を背景に、我が国ではMEMSという言葉も一般的になり、材料を構成する物質の微小化、微小な電気・機械部品、もしくはそれらを製造するための機械が開発されているが、必ずしも「マイクロマシン」が実現している訳ではない。機械部品を小さくすることは基本技術として重要であるが、それだけで超小型化した機械が円滑に作動することは一般的にはあり得ない。本研究は、将来の真のマイクロマシンの実現を見据えて、機械要素を小型化した際の機械の動的特性に焦点をあてた重要な基礎研究と位置付けている。

現在、機械工学の進む方向は様々な意見があるが、近い将来にわたる各種機械の発展方向は「知能化」と「小型化」である。知能化に関しては最近の自動車の自動運転の実用化報道にあるように着実に進展している。一方で、機械の小型化に関する研究・技術開発は「静力学」の概念を超えていない。ニュートン力学に基づく静力学および動力学分野では通常の大サイズの物体に対してはマクロ的な取扱が可能であり、その挙動を推定することができる。また、原子や分子レベルでは、ミクロの取扱において量子力学が導入され、その対象のモデル化が可能である。しかし残されている重要な課題は、その中間領域(メゾ領域)の検討がなされていないことである。

申請代表者の専門分野は機械力学であるが、従来からニュートン力学の高い汎用性を認識すると同時に、ニュートン力学によるモデル化の限界に興味をもっていた。特に近年、微細加工技術を背景として機械をどこまで小さくできるか、また従来のモデルはどこまで可能かという疑問に対する回答を探している。現時点で静力学的には幾

何学形状からある程度の予測が可能であるが、動力学に関しては全く手をつけられていない。そこで、ミクロンサイズの超小型振動系に対する基礎研究、さらにはその振動系の振動抑制方法に興味をもつに至った。

2. 研究の目的

本研究では、線径20ミクロン、直径が数百ミクロン程度の超小型コイルばねを用いてマイクロ振動系を実験的に構築して、この振動系の動的特性と従来のニュートン力学に基づく予測値とを比較し、その差異の原因特定と定量的考察、さらには振動抑制方法について検討を行うことを目的としている。MEMSを中心にマイクロセンサの開発、さらにはマイクロマシンの開発は研究レベルで積極的に試みられているが、単に寸法を小さくしたものが多く、しかも動力学を考慮された研究はみあたらない。振動系を極めて小さくした際に、空気抵抗、静電気力、摩擦力、構造減衰等の影響について定量的な考察を行うことによってマイクロマシン実現への基礎的知見を獲得する。さらにマイクロ振動系に対する振動抑制法について検討する。

3. 研究の方法

本研究では、超微小コイルばねと質量の2要素からなる振動系に対して、(1)1自由度振動系の構築および実験、(2)多自由度振動系の構築および実験、(3)振動抑制方法の具体的提案の3項目を実施する。コイルばねは線径20ミクロン、直径が数百ミクロン程度のもを用いる。質量は固有振動数を調整するため数種類の鋼球を用いる。このような超小型振動系の振動実験を行った例は申請代表者以外にはなく、ばね部材の材料減衰、空気抵抗、静電気力、摩擦力等の影響で、理論値とは異なることが予想され、その原因の特定および定量的な考察を行う。質量球の変位測定には既に申請代表者の測定例にあるハイスピードマイクロスコープにより映像からの読み取りを行う。振動抑制に関しては磁気粘性流体等の機能性流体を超小型振動系内部に配置し、電場や磁場を与えることにより、その効果を検討する。さらに、制御系としては集中制御用コンピュータを利用するのではなく、振動系内部のセンサおよびアクチュエータをユニットとする情報通信網を形成し、人工的ニューラルネットワークを参考にして、群知能による振動制御系の開発を行った。

4. 研究成果

(1)1自由度振動系の構築および実験

超小型ばねの製作を専門業者に依頼し、線径20ミクロンのピアノ線(SWP-H)からなる、直径200~400ミクロンの引張り用のコイルばねを製作した。20ミクロン以下の線径では安定したばねの構造を保つことができないため、これより小さな径のピアノ線によるば

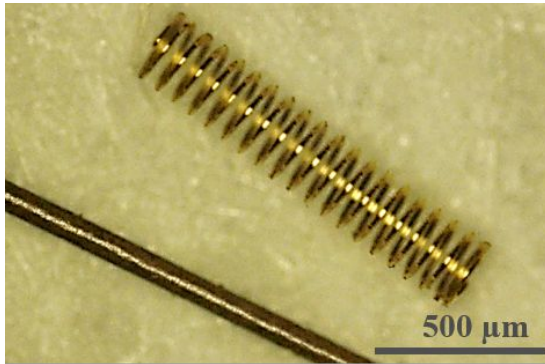


図1 製作した超小型ばね

ね製作は断念した。

製作したばねを毛髪と比較して図1に示す。ばねは圧縮型のばねであり、総巻数は20程度とした。ばねには防錆のために金メッキを施している。

このばねの一端に小さなステンレス球を接着し、他端を固定して、初期変位を与えることで振動を励起する。ばねの固定方法にも工夫が必要で、瞬間接着剤等を使用すると表面張力効果のために接着剤がばねの内部に入り込み、ばねの有効巻数が減少してしまう。結果として、非常に薄く接着剤を塗布して接着することとした。一例を図2に示している。

初期変位の与え方についても、どのような道具を用いて初期変位を与えるかも問題があり、静電気のために道具から質量が離れない状況も多々ある。さらに、対象があまりに



図2 超小型ばねによる1自由度振動

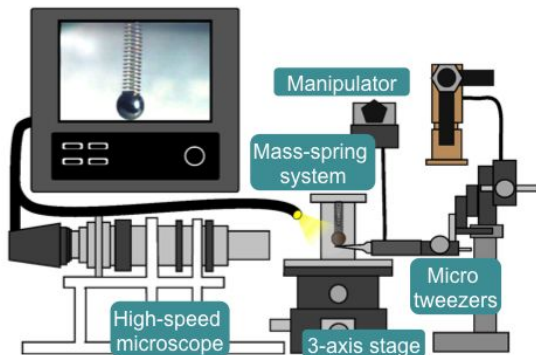


図3 実験装置の概要

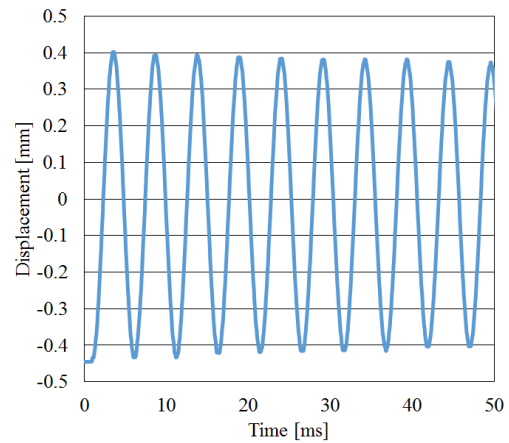


図4 減衰自由振動波形

小さいために、振動変位がスケールや変位計等を用いた通常の方法では測定できず、高速度カメラにより動画像を取得し、ソフトウェアにより変位を算出した。全体の実験装置の構成を図3に示している。

この実験装置を用いて測定したデータの一例として、図4に自由振動波形を示す。図から減衰が非常に小さいことが推定される。自由振動波形から推定すると、減衰比に換算して 5×10^{-4} 程度となっている。

一般に減衰作用の原因となるのは、空気抵抗、ばね材の内部摩擦、ばね固定部の摺動摩擦などが考えられるが、これらについて詳細に検討した例は少ない。ここでは、これらの原因の中で、空気抵抗の影響について実験的に検討した。超小型ばねを支持部とともに電磁加振器に固定し、電磁加振器ごと簡易型の真空チャンバーに入れた。電磁加振器により初期の振動を与えて一旦停止し、その残留振動から減衰比の算定を行った。真空度は20~100kPaとして実験を行った。その結果を図5に示している。図では3本の超小型ばねを使った結果であるが、ばねによって減衰比に対して個体差が認められた。しかし、20kPaでは7~10%程度ではあるが減衰比が小さくなった。ばねによって個体差がでた理由については、材料は同じものなので、原因は明らかではない。

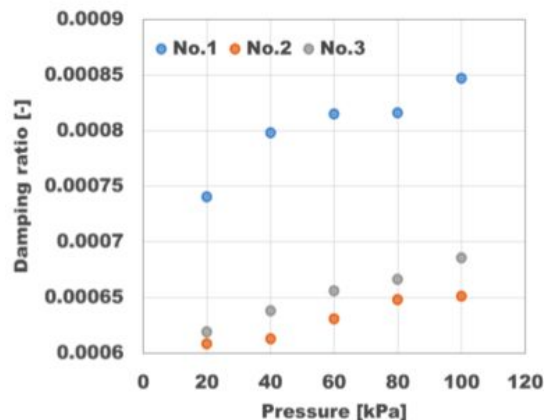


図5 減衰比に与える真空度の影響

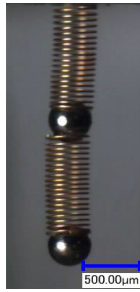


図6 2自由度振動系

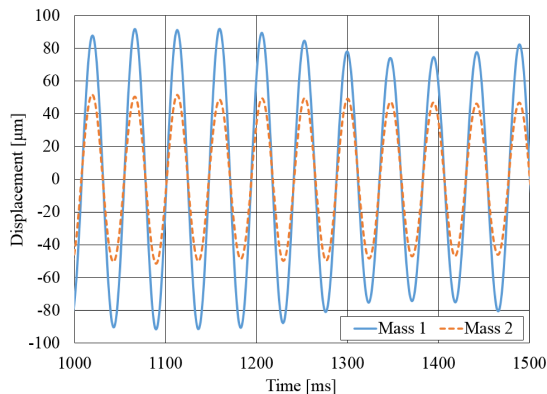


図7 減衰自由振動波形

(2) 多自由度振動系の構築および実験

本研究で用いた2自由度振動系の例を図6に示す。今回用いたばねは直径400ミクロンであり、端部に1巻きずつ座巻きを有する圧縮コイルばねとして製作されたものである。また、錘は、錘を中心とした回転方向の振動を抑えるためにばねと同じ径のものを使用した。

構築した2自由度振動系を自由振動させた結果、2つの錘が同位相で振動するモードが卓越して確認された。図7には観測された波形からノイズを取り除いた1次モードの振動波形を示している。うなりが生じているのは横揺れの振動が1次の固有振動数に近かったためである。図中のMass 1は振動系の中央部に取り付けた錘、Mass 2は下部に取り付けた錘を示している。この固有振動数は理論的に予想したものとほぼ一致している。

本論文で扱った程度の超小型2自由度振動系の固有振動数がニュートン力学を用いた計算により推定できることを実験的に示した。ばねの質量が無視できない大きさであるために、ばね内部に進行波が発生する場合も観察されたが、これについてはさらに実験的検討を加えたい。また、減衰の大きさについては、さらに多くの実験的検討が必要である。

(3) 振動抑制方法の具体的提案

可変減衰の付与方法

振動を抑えるためには、受動制振、準能動

制振、能動制振の3通りに分類される各種手法がこれまで提案されている。機械を小型化しても、十分に設計段階で検討を行うことによって機器に好ましくない振動を抑制することは重要であるが、それが避けられない場合には、何らかの制振手法を用いることが妥当である。

本研究課題の中では、準能動制振手法としてのMRグリースによる制振方法について検討した。能動制振を行うためには、制振機器としての新たなマイクロマシンが必要であり、本研究としてその選択は好ましくないと考えた。一方で受動制振では制振対象に対して柔軟性がないと判断した。

MRグリースは、外部から与える磁場の大きさによって、グリースに発生する降伏せん断応力を変化させることができる機能性流体であり、研究代表者によって開発された。グリースの内部に微小な磁性体を分散させている。また、MR流体のように、長期間の使用においても分散粒子の沈降が少ないことが示されている。

MRグリースもしくはMR流体は粒子分散系の機能性流体であるために、作動空間のせん断面積、隙間が小さくなると粒子の影響が無視できず、効果が離散的になることが予想される。粒子の大きさは10ミクロン程度なので、100ミクロン程度から影響がでることが推定され、実験装置を設計・試作して実験を行った。しかし、力が小さいためにその測定計を十分に設計することができず、安定した測定結果を得ることができなかった。今後さらに継続して検討を進めたい。

制御系

機械構造物が小型化されると、その振動制御系も小型化する制約が与えられる。現状では、制御系としてコンピュータが必要であるが、その大きさが小さくなる必然性がない。そこで発想を変えて、大きさのある中央処理型コンピュータを用いるのではなく、機械構造物に設置されるセンサとアクチュエータからなる多数のユニットで情報網を構成し、その情報網に制御系の機能を持たせた群知能の概念を適用することとした。群知能を制御系に適用するのは新しい概念であるために、最初から小型を想定するのではなく、通常の大サイズの機械構造物に適用して、その有用性を検討した。

機械構造物を模擬した集中質量系に対してセンサとアクチュエータの対からなるユニットを自由度の数だけ配置し、各ユニットを通信によるリンクで相互に結合したシステムを構築した。このシステムは、ユニット間の結合によって相互結合型ネットワークを構成させ、ネットワークは学習機能と出力の調整機能を有している。それらの特徴を利用して、ネットワーク上に記憶すべきパターンベクトルを発現させ、さらに出力の調整機能により集中質量系の振動抑制を行うことを目指している。出力を調整するアクチュ

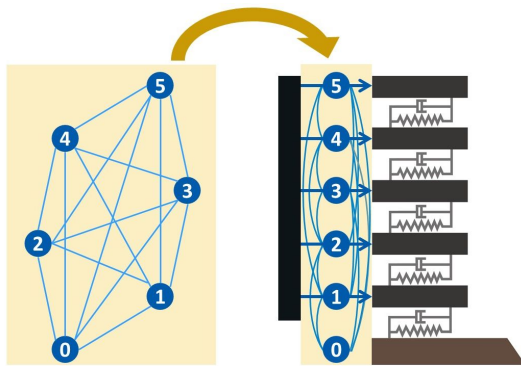


図 8 群知能による制御系の概念図

エータとして可変減衰器を想定し、可変減衰器の特性をネットワーク上で生成された調整機能で制御した。

制御する対象としては、5 自由度の集中質量系とした。ユニット間のネットワークを用いて、この集中質量系の制振を行うことを考える。図 8 に示すように、変位センサとアクチュエータとして可変減衰器を持つユニットを各質量部に配置し、その上、基礎部にも変位センサを持つユニットを配置する。ここで通信によってこれらのユニット間を結合する。ユニットを構成するセンサ情報に基づいて、各質量の変位を状態量とする振動状態ベクトルを設定できる。

一般論として、相互結合型ネットワークはニューラルネットワークの一形態として学習機能を有している。その学習は記憶させたい出力パターン（以下、記憶パターン）から重み係数を決定することで行われる。すなわち、相互結合型ネットワークは、記憶パターンベクトルを学習することができる。本制振対象の場合は、記憶パターンは最大で 5 つを指定して与えることができ、射影則を用いてネットワークに記憶させた。記憶パターンベクトルは 5 つある質量部分についてそれぞれの振動が止まっている状況を設定し、振動状態ベクトルの制振目標としている。このネットワークを用いて可変減衰を調整することで、制振目標を達成することを試みた。

本研究では数値計算によって上記の検証を行った。Newmark-法を用いて、1 ステップを 0.01 秒として運動方程式により時々刻々の状態量を推定した。記憶パターンを上述のように与え、各固有振動数付近で加振を行い、120 秒後に定常状態となるので、そこから制御を開始した。まず、加振開始後 120 秒前後における各質量部分の変位応答を時系列で表した一例を図 9 に示す。図 9 は構造系の 1 次の固有振動数付近で励振したものであるが、制御が開始してから 1 秒以内で定常状態に到達し、機械構造物全体の振動を抑えることができていることがわかる。他の固有振動数に近い外乱を与えても同様な結果が得られた。

図 10 には、振動制御を行ったときの振動

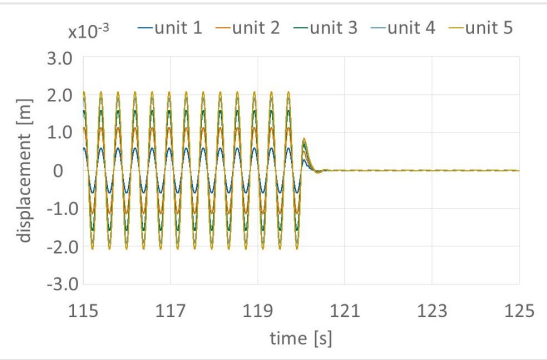


図 9 時刻歴応答の一例 (2.56Hz)

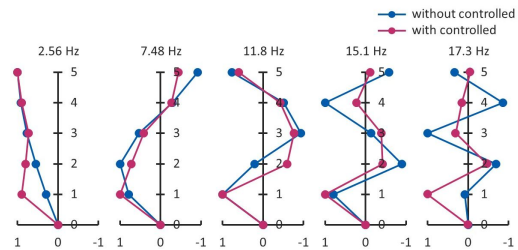


図 10 制振前後の振動モード

モードを示している。制振目標は記憶パターン、すなわち 5 つある質量部分についてそれぞれの振動が止まっている状況を設定しているため、固有振動モードとは一部モードが異なっているが、十分に各モードで制振している様子がわかる。

以上の検討の結果、センサおよびアクチュエータから構成されるユニット間のネットワークにより、ネットワーク上に学習機能を持たせることができることを示した。学習機能によって集中質量系の振動パターンを記憶させることができた。また、このネットワークを利用して、集中質量系の振動を抑制できることを示した。これにより、簡易的な振動監視システムの構築ができることを明らかにした。今後は、本群知能による制御系の有効性を示すために、実験的な検証を行うことが求められる。

(4) その他の成果

センサの小型化

マイクロマシンが実現され、その振動の抑制について考えると、振動を感知するセンサそのものも小型化が要求される。研究代表者が考える究極のマイクロマシンは細胞である。細胞はセンサとしての数多くの膜タンパク質を有し、アクチュエータとしては細胞内部に縦横無尽に存在するアクチンフィラメントである。自律系としてはさらに制御系が必要であるが、これについては次項で述べる。

本研究と並行して、細胞が外部からの機械的刺激、特に振動に反応する研究を行った。その結果、ある特定の振動数をもつ振動を加えることで、振動を加えない場合と比較して、一定期間内に細胞数が約 2 倍に増加することを実験的に明らかにした。さらに振動によ

て細胞内部の様々なタンパク質の産生が影響を受けることを示した。これらの実験的な事実から、細胞には振動を感知するセンサが存在し、様々な考察から膜タンパク質の一種であるインテグリンがその役割を果たしていることを示した。

インテグリンを取り出して振動実験を行うことは现阶段では困難なために、インテグリンを集中質量系でモデル化して、有限要素法による固有振動解析を行った。その結果、超音波程度の振動数の固有振動数をもつことを明らかにした。インテグリン自体の境界条件が明らかではないために多くの仮定をして計算を行う必要があり、それらの仮定を今後一つずつ確認する必要がある。また、インテグリンをセンサとして活用するために、タンパク質からの信号を抽出する技術が必要である。

細胞内部の制御系の推定

細胞が自律系であると仮定すると、細胞内部に制御系をもつ必要がある。特定の制御機能をもつ器官は細胞にはないので、それに代わるものとして、タンパク質のネットワークが学習機能および制御機能をもつ可能性について数値計算により検討した。その結果、細胞内に無数に存在するタンパク質のネットワークを分子細胞生物学の知見をもとに仮定し、さらに情報工学におけるネットワーク理論、物理工学・機械工学における物質の拡散理論を活用することで、内部に記憶回路が形成できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

S.Hamada and S.Morishita, Dynamic Properties of a Very Small Mass-Spring System, Proceedings of 17th Asia Pacific Vibration Conference 査読有 (2017-10)#237 (全5ページ)

T.Hiura and S.Morishita, A Vibration Control System Based on Swarm Intelligence with Variable Dynamic Damper, Proceedings of 17th Asia Pacific Vibration Conference 査読有(2017-10)#243 (全10ページ)

濱田将平, 森下信, 超小型2自由度振動系の動的特性に関する研究, 日本機械学会 関東支部山梨講演会講演論文集, 査読無 No.170-3 (2017-10) #208 (全2ページ)

T.Hiura and S.Morishita, Application of Swarm Intelligence to a Vibration Monitoring System, Proceedings of ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent System, 査読有(2017-9) #SMASIS2017-3734 (全6ページ)

S.Hamada and S.Morishita, Vibration Characteristics of Small Mass-Spring System, Proceedings of 5th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control

査読無(2017-8)#J22 (全8ページ)

樋浦琢也, 森下信, 群知能を用いた振動監視システムが認識する振動モードについて 日本機械学会 機械力学計測制御部門講演会講演論文集, 査読無 No.17-13 (2017-8) U00033 (全8ページ)

6. 研究組織

(1)研究代表者

森下 信 (MORISHITA Shin)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・

教授

研究者番号：80166404