

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630073

研究課題名(和文)ゼロコンプライアンス機構を利用した微小力測定装置の開発

研究課題名(英文)Development of micro force measurement systems using zero compliance mechanism

研究代表者

水野 毅 (MIZUNO, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20134645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ゼロコンプライアンス機構を利用した力測定装置の開発を行った。最初に、微小力の測定に適した1自由度力測定機構を開発し、実際に検出点の位置を一定に保ったまま、微小力を高感度で測定できることを実証した。さらに、動的な力の測定も行えることを示した。つぎに、開発した力測定機構を4個組み合わせることによって、3分力測定装置を構築し、その性能を評価した。その結果、開発した測定機構の構造では、軸間干渉が大きいことが確認された。そこで、検出点及び作用点が一体となった多次元力測定装置を開発し、提案する方式によって多分力測定が行えることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Force measurement systems using zero-compliance mechanism were developed. First, a single-axis force measurement mechanism suitable for micro force measurement was fabricated. It was confirmed experimentally that the force was estimated from the displacement of the detection point while the point of action was kept at the original position. It was also demonstrated that dynamic force can be measured by the proposed method. Next, a three-component force measurement system was constructed by combining four single-axis force measurement mechanisms. Actual measurements were carried out with the fabricated apparatus. The results showed that there were some interactions among the axes. Finally, another three-component force measurement system was designed and fabricated which had a single detection point and point of action. Actual force measurements were carried out with the apparatus, which demonstrated the efficacy of the propose force measurement method.

研究分野：制御工学・メカトロニクス

キーワード：力測定 力学量計測 ゼロコンプライアンス機構 微小力測定

1. 研究開始当初の背景

力は最も基本的な物理量の一つであり、既に様々な測定方法が存在する。それらは、開いたシステムによる測定（偏位法）と閉じたシステムによる測定（零位法）とに大別できる。最も広く用いられている装置は前者に属し、代表的な例がロードセルである。この方法の基本的な問題は、測定感度を高くするには測定系の剛性を低くすべきであるが、低剛性とするのと力の作用点の変位が大きくなり、力の発生源と作用点の距離などの測定条件が変わってしまうことである。また、測定系の固有振動数が低くなり、測定周波数帯域が狭くなることも実用的には大きな問題である。一方、零位法の一つとして、サーボ系を構成して、作用点の位置を一定に保つような制御入力から力を推定する方法がある。この場合、作用点の変位しないので、偏位法のような測定条件が変わるといった問題が生じない。しかしながら、測定帯域を広くする場合にはハイゲインフィードバックが必要となり、制御入力に混入するノイズのため、測定感度が低下してしまう。このため、微小力を測定する場合には、偏位法が利用される場合が多いが、測定条件を変えてしまうという基本的な問題点は解決できない。

2. 研究の目的

研究代表者は、長年にわたって、負の剛性を利用した除振装置の開発を進めてきた。その原理は、正のばね剛性を持つばねと負のばね剛性を持つゼロパワー磁気浮上機構とを中間台を介して直列に接続し、それぞれの剛性は低くすることによって振動絶縁特性を確保し、両者の大きさ（絶対値）を一致させることによって直動外乱に対する剛性を無限大とするというものである。本研究は、この原理を力測定に利用することから着想に至ったものである。具体的には、正の剛性を持つ支持機構と負の剛性を持つ支持機構とを直列に接続したゼロコンプライアンス機構で力の作用点を支持することによって、偏位法と零位法の利点を合わせ持った力測定装置を実現する。

これまでの研究では、直列二重磁気浮上を利用した基礎実験装置を試作して、提案する方法によって、従来のサーボ機構を利用した測定方法に比べて高精度に力を測定できることは実証している。しかしながら、この装置では、作用点などの質量が比較的大きく、mN オーダの力測定しか行えなかった。本研究では、微小力の測定に適した測定装置を開発し、実際に検出点の位置を一定に保ったまま、微小力を高感度で測定できることを実証する。さらに、動的な力測定及び多次元力測定が可能であることを実証する。

3. 研究の方法

(1)提案する力測定機構によって、微小力を高感度に測定できることを実証するために、ゼ

ロコンプライアンス機構を備えた実験装置を試作して、測定原理の検証及び諸特性を把握する実験を行なう。

①微小力測定装置の設計・製作

提案する測定機構では、二つの支持機構を検出点を介して直列に接続した先に力の作用点（プローブ）が設けられている。基本原理を説明するときには、一つの支持機構をばね定数が負のばね（負のばね）、もう一つの支持機構をばね定数が正のばね（正のばね）としていたが、実際には、単純に負のばねを用いると系全体が不安定になってしまう。したがって、少なくとも一つの支持機構は能動形とする必要がある。実用的には、一方の支持機構を能動形とすれば十分であるが、本研究では、様々な条件で実験を行うために、両者を能動形とする。能動形支持機構のアクチュエータとしては、電磁石、ボイスコイルモータ、圧電アクチュエータなども利用できるが、本研究では、構造が簡単なボイスコイルモータを用いる。

②基本特性の測定とモデル化

アクチュエータへの入力と変位及び作用点に発生する力との関係を測定することによって、各支持機構の基本的な特性について調べる。つぎに、測定した結果に基づいて、実験装置の数学的なモデルを構築する。

③制御システムの構築

②で導出したモデルに基づいて、作用点に力が働いても作用点が（定常的には）変位しないゼロコンプライアンス特性を実現する制御系を構築する。具体的には、検出点の変位に関しては PD 制御を適用し、正の剛性をもつようにする。作用点の変位に関しては、PID 制御を適用する。

④測定性能の評価

まず、作用点に作用する力をステップ状に増加させていき、そのときの検出点の変位を測定する。つぎに、作用力を減少させていって同様な測定を行う。これらの測定によって、試作した装置の直線性・分解能やヒステリシス誤差などの静特性を把握する。つぎに、圧電素子などを用いて作用点に正弦波状の力を加えて、動特性を取得する。特に、③で構成した制御系と測定周波数帯域及び分解能との関係を調べる。高い測定周波数帯域が得られないときには、変位相殺制御を用いるなど、制御系を改良して、動特性の向上を図る。

(2)提案する力測定機構によって、多分力の測定を行えることを実証するために、前年度に開発した測定機構を複数組み合わせることで3分力測定装置を構築して、その性能を把握する。

①3分力測定装置の製作

作用点に作用する力の3分力を測定するには、つぎのような方式が考えられる。

- (a)検出点を三つとして、3個の検出点変位を組み合わせ、検出する（分散形）
- (b)検出点を一つとして、検出点の3次元変位を検出する（一体形）

ここでは、(1)で開発した1次元力測定機構4

台を立体的に組み合わせて、検出点分散形3次元力測定装置を構築する。

②制御系の実装と測定性能の評価

(1)と同様な手順で制御系を実装し、性能の評価を行う。特に、作用点に作用する力の方向を様々に変化させて測定を行い、直線性・分解能やヒステリシス誤差などの基本特性に加えて、軸間の干渉の大きさについて詳しく調べる。

(3)検出点一体形3分力測定装置を開発し、その性能を把握する実験を行い、3分力測定に最適な構造についての知見を得る。

①一体形3分力測定装置の設計・製作

検出点を一体とした構造の装置の設計・試作を行う。

②制御系の構成と測定性能の評価

(2)と同様な手順で制御系を実装し、性能の評価を行う。そして、前年度開発した分散形との性能を比較し、どちらが3分力の測定に適しているかについての知見を得る。

4. 研究成果

(1)アクチュエータとしてボイスコイルモータを利用した実験装置を試作し、この実験装置を用いて測定原理の検証及び諸特性を把握することができた。

①1自由度力測定機構の製作

試作した装置の外観を図1に示す。装置上部には、一体型平行ばねとボイスコイルモータ(VCM)を組み合わせた測定機構が固定されている。装置の中央と下部には光学式の変位センサが固定されており、これにより検出点、及び作用点の変位を検出した。下部には外力発生用VCMを設置し、動的な外力特性も取得できるようにした。

②数学的モデルの構築

検出点の変位を z_1 、作用点に作用する力を w とすると、伝達関数は以下のように求められた。

$$\frac{Z_1}{W} = -\frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

この制御系において一定の外力 w_0 が作用し

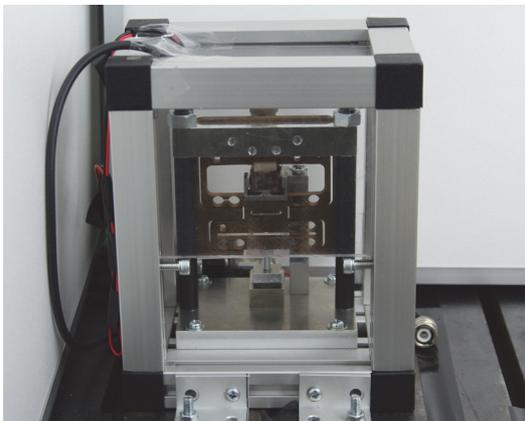


図1 実験装置の外観

たとき、定常変位は、以下のようになることを導くことができた。

$$Z_1(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sZ_1(s) = \frac{b_0}{a_0} w_0 = -\frac{w_0}{k_2}$$

ここで、 k_2 は、作用点を支持する正のばねのばね定数である。この式から、ばね定数の小さいばね(柔らかいばね)をもちいることによって、高感度の力測定が行えることを理論的に導くことができた。

③制御システムの構築

②で導出したモデルに基づいて、作用点に力が働いても作用点が(定常的には)変位しないゼロコンプライアンス特性を実現する制御系を構築した。

④測定性能の評価

装置下部に取り付けた外力発生用VCMを駆動することで、作用点に外力を与えた。測定した結果、作用点を変位させることなく、検出点及び制御電流が線形的に変化していることがわかった。すなわち、検出点の変位から力の推定が可能であることを実証した。また、全体を通して、ヒステリシスの小さい高精度な測定が行えることを実証した。

(2)(1)で開発した1次元力測定機構を複数台組み合わせ、検出点分散型3分力測定装置を構築し、その性能を評価した。

①3分力測定装置の構築

当初の計画では、1自由度力測定機構3台を立体的に組み合わせて、検出点分散形3次元力測定装置を構築する予定であったが、構造的な問題から、1次元力測定機構4台を組み合わせて、鉛直方向の力に加え、これまで測定を実現できなかった二方向トルクの測定を実現できるような装置を開発した。

②制御系の実装と測定性能の評価

(1)と同様な手順で制御系を実装し、性能の評価を行った。特に、作用点に作用する力の方向を様々に変化させて測定を行い、直線性・分解能やヒステリシス誤差などの基本特性に加えて、軸間の干渉の大きさについて詳しく調べた。その結果、軸間干渉が大きく、このままの構造では、精度の高い測定は難しいことを確認した。

(3)検出点一体形3分力測定装置を開発し、この実験装置を用いて3分力測定を行った。

①3分力測定装置の設計・製作

試作した装置の外観を図2に示す。本機構は二つのばねが直列に接続された構成になっており、このばねを三つ用いて検出点と作用点を支持している。また、検出点と作用点は一体化された構造になっており、一つのシステムでの3自由度力測定を実現した。検出点駆動用のアクチュエータとしては、VCMを3個用いた。

②測定性能の評価

製作した実験装置において、静的外力を加えたときの検出点と作用点の変位を取得した。作用点への静的な三分力は、作用点の端

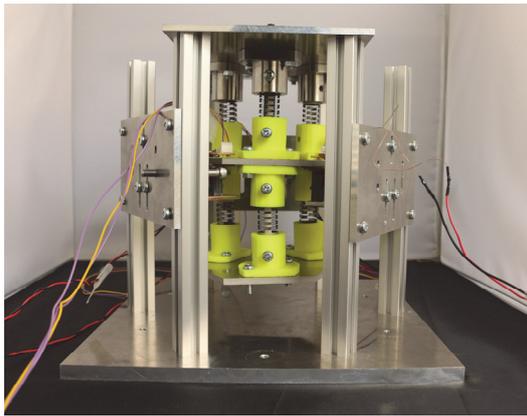


図2 三分力測定装置の外観

に重りを負荷することにより与えた。測定した結果から、作用点は変位せず、検出点のみが線形的に変位していることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

[1] 水野 毅, 関根 大輔, 高崎 正也, 石野 裕二: 直列二重磁気浮上を利用した力測定, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.814, DR0163, 2014.

〔学会発表〕(計 12 件)

[1] 林 陽一郎, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二, 山口 大介, 原 正之: カンチレバー式ゼロコンプライアンス機構を用いた力測定システムの開発 第 1 報: 測定原理, 第 24 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 査読無, pp.457-460, 2015.

[2] Takeshi Mizuno, Yoichiro Hayashi, Yuji Ishino, Masaya Takasaki, Proposal of Force Measurement Using a Zero-Compliance Mechanism, Proc. XXI IMEKO World Congress, 査読有, pp.317-320, 2015.

[3] 飯田 啓介, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二, 原 正之, 山口 大介: ゼロコンプライアンス機構を利用した三分力測定装置の開発 (第 1 報: 基本構想と測定機構の製作), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集, 査読無, 443, 2015.

[4] 林 陽一郎, 山口 大介, 石野 裕二, 原 正之, 高崎 正也, 水野 毅: カンチレバーを利用したゼロコンプライアンス式微小力測定, 日本機械学会関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, pdf.511, 2015.

[5] ムハマド イザーン, 石野 裕二, 山口 大介, 高崎 正也, 水野 毅: ゼロコンプライアンス機構を利用したトルク計測装置の開発 第 1 報: 測定原理と基礎実験装置の開発, 第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松—電磁現象および電磁力に関するコンファレンス—講演論文集, 査読無, pp.111-114, 2014.

[6] 林 陽一郎, 石野 裕二, 高崎 正也, 水野 毅: 直列多重磁気浮上による微小力の非接触

測定に関する研究 第 6 報: 作用点の運動を 1 自由度に拘束した装置の開発, 第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松—電磁現象および電磁力に関するコンファレンス—講演論文集, 査読無, pp.115-118, 2014.

[7] 高林 篤, 水野 毅, 石野 裕二, 高崎 正也: ゼロコンプライアンス機構を利用した微小力測定 (第 3 報: 測定周波数帯域に関する検討), 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集, 査読無, pdf.10703, 2014.

[8] 高林 篤, 水野 毅, 石野 裕二, 高崎 正也: ゼロコンプライアンス機構を利用した微小力測定 (第 2 報: 一体型平行ばね機構を組み合わせた三分力測定装置の開発), 第 22 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 査読無, pp.321-324, 2013.

[9] 石井 一成, 高崎 正也, 石野 裕二, 水野 毅: 直列二重磁気浮上を利用した三分力測定装置の開発, 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集, 査読無, B01, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: 力測定装置

発明者: 水野 毅

権利者: 埼玉大学

種類: 特許

番号: 第 5912338 号

出願年月日: 2011 年 8 月 26 日

取得年月日: 2016 年 4 月 8 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://control.mech.saitama-u.ac.jp/home-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 毅 (MIZUNO, Takeshi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 2 0 1 3 4 6 4 5

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高崎 正也 (TAKASAKI, Masaya)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 1 0 3 3 3 4 8 6

石野 裕二 (ISHINO, Yuji)

埼玉大学・総合研究機構・技師

研究者番号: 5 0 6 4 5 9 6 8