

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18287

研究課題名(和文)非接触アクチュエータを用いた人工衛星ペイロードの空間安定制御

研究課題名(英文)Inertial Stabilization Satellite System with Non-contact Actuators and Sensors

研究代表者

巳谷 真司(Mitani, Shinji)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：00747446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、人工衛星で高指向安定度を実現する手法として、ミッションペイロード部をバス部から完全に切り離して空間安定させる制御の実現性検討が実施された。静電容量型非接触変位センサと中実型の非接触型ボイスコイルモータ(VCM)を非同軸に配し、合計6軸のストラット型に配置した、空間安定装置の設計を実施し、VCMコイルとヨーク間隙が0.5mmの場合、並進1mm、回転0.5degの6自由度移動量を有する、直径225mm、高さ50mm、全体1kg以下のコンパクトな実験システムを構成することができた。実験システムとは独立に、変位センサ-中空型VCM1軸校正装置を試作し、提案システムの実現性を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, as a method to realize high directivity stability in artificial satellites, feasibility study of control to completely stabilize the pointing by separating the mission payload part from the bus part was carried out. We designed the space stabilizer in which the capacitance type non-contact displacement sensor and the solid type non-contact type voice coil motor (VCM) are arranged non-coaxially and arranged in a total of 6-axis strut type. As a result of the design, when the gap between the VCM coil and the yoke is 0.5 mm, a compact experimental system having a diameter of 225 mm, a height of 50 mm, and a total of 1 kg or less, which has a movement amount of 6 degrees of freedom of translation 1 mm and rotation 0.5 deg, was constructed. Beside on the experimental system, a displacement sensor - hollow type VCM single axis calibration device was prototyped and feasibility of the proposed system was examined.

研究分野：人工衛星の航法誘導制御

キーワード：高精度指向制御 非接触アクチュエータ 非接触センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究は、地球観測や天文観測を行う人工衛星の新しい姿勢制御方法に関するものである。近年、高精度指向安定を必要とするミッションが増加しており、姿勢制御リアクションホイールや軌道制御用スラストの発する振動擾乱が問題となっている。擾乱源自体の低擾乱化や伝達経路への減衰機構の挿入などの源流対策では精度の向上に限界がある。そこで、図1のように、スラスト、リアクションホイール等の擾乱源を搭載する衛星バスとミッションペイロード間を空間的に切り離し、非接触のセンサとアクチュエータを用いて能動的にペイロード指向方向を制御することが考えられる。このようなシステムが実現できれば、バス部からペイロード部への振動伝達を遮断し、ペイロード部を慣性空間に対して安定に制御することが可能となる。また、振動絶縁のみならず、バス部からの熱伝導も遮断されるため、ミッション機器の熱ひずみを抑制できるなどの利点も考えられる。

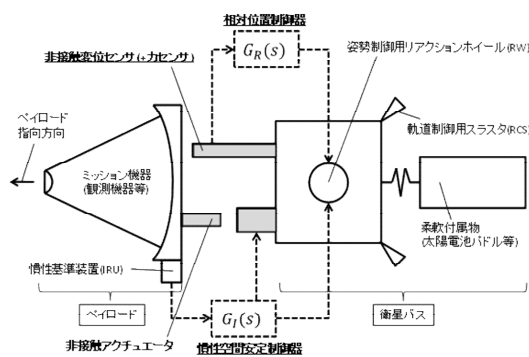


図1 提案する空間安定制御システムの概要

(2) 物体間の非接触制御に関しては、超伝導コイルと超伝導体を用いた非接触位置決め機構の研究がある。また宇宙分野では、低周波重力波検出のために超電導磁気浮上を利用した高感度ねじれ振子の研究事例がある。さらに、宇宙空間的に離れたバス部とミッション部を2機の人工衛星と見立てると、2つの近接した宇宙機のフォーメーションフライト(FF)とも捉えられる。その衛星間の距離を超伝導磁石により相対保持制御する研究も過去に実施されている。これらはいずれも物体間の相対6自由度制御を行うものであるが、本研究で提案するシステムは、ペイロードの6自由度空間安定または指向制御を目的とする。このため、2機間の相対位置・姿勢を計測する相対センサに加えて、ペイロードの慣性系に対する位置・姿勢を計測する慣性基準装置(IRU)や指向誤差検出センサをペイロード側に搭載したシステムに拡張して考えることとなる。

2. 研究の目的

(1) 提案する空間安定システムを実現する上

で、センサ、アクチュエータ、信号・電力伝送の全てをバス・ペイロード間で非接触方式にしなければならない。センサに関しては、渦電流式、静電容量式等の方式が実用化されている。信号・電力伝送に関してもモバイル技術の発展に伴う無線LANや非接触給電技術の応用が期待できる。したがって、本方式を実現するためにはアクチュエータの実現性に取り組むべき研究課題があると考えられる。本研究では、精密位置決めが実現可能なボイスコイルモータ(VCM)技術を応用した完全非接触アクチュエータを試作する。VCMはコイルをヨーク内で一方に駆動可能である。しかし、駆動軸直交方向の運動は自由となるため、コイルとヨークが接触しないよう板バネ機構等で一般に支持されるが、その板バネ自体が熱・振動の伝達経路となりうる。そこで、複数本のVCMを様々な方向に組合せ、6自由度の併進・回転制御を精密に行える非接触アクチュエータ機構を新たに提案する。それらを複数本組み合わせることにより、完全非接触な精密6自由度位置決め機構を実現可能なことを示す。このVCMによる非接触アクチュエータのサイジング検討(サイズ、重量、電力)と複数本の配置最適化検討を行った上で、提案システムの振動絶縁性(制御精度、帯域)について検討を行う。アクチュエータ以外の相対変位センサ、信号・電力伝送についても非接触方式の既存品を組み込み、計測・制御及び信号・電力伝送全てを非接触にした6自由度精密制御機構を構築し、その振動・熱絶縁性能を検証する。また、フォースセンサ等も併用し、低周波絶縁性能を保持しつつ高周波も減衰可能な制御則を検討する。その他、打ち上げ時や非通電時の保持解放機構についても検討及び、アクチュエータ故障時の冗長性検討も実用化の上では重要であり、これらを机上検討により実施する。

3. 研究の方法

(1) まず、VCMによる非接触アクチュエータのサイジング検討(サイズ、重量、電力)と複数本の配置最適化検討を行う。本研究で提案する非接触アクチュエータの概略(断面図)を図2に示す。バス側接続部側が誘導コイルとなり、ペイロード側接続部がヨーク及び磁石となる。ペイロード側は振動伝達・発熱源となる配線や電気回路を有することなく構成可能である。コイル電流を制御することにより、接続方向(軸力)を一定に保持する。軸直交方向は自由となるが、他軸の別アクチュエータで直交方向の運動を拘束する。図3にパイポッド構成のアクチュエータ×3組にした配置例を示す。6自由度を保持制御することから最低6本必要であるが、本方式では完全に非接触であるため、6本より多く配置しても過剰拘束にはならない。この冗長自由度をアクチュエータ故障時の冗長性確保の目的で使用することも可能である。

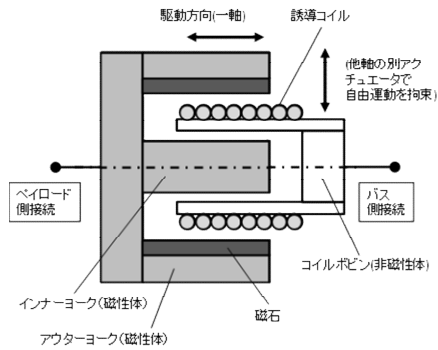


図2 提案する非接触式アクチュエータの断面図

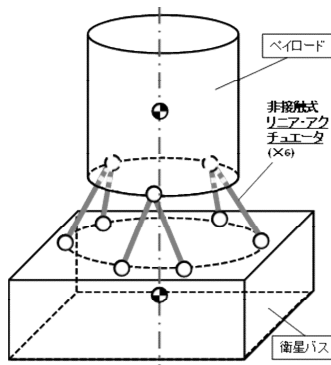


図3 非接触式アクチュエータの配置例

(2) 本研究のコンセプトを、実際に6自由度拘束のN(6)本のVCMによるアクチュエータシステムを構築することにより実証する。構築予定の実験システムを図4に示す。慣性センサには小型ピエゾ方式加速度計やMEMSジャイロ等を用いる。電力供給には非接触給電方式を採用する。図4に提案する実証システムの検証例を示す。無線はLANやBluetoothが利用できる。本アクチュエータシステムは、重力下でも機能するように軽く小型に作られる。また、本システムを横向きにして空気パッドで浮上させることも可能なよう設計し、二次元浮上定盤を用いた3自由度(並進2自由度、回転1自由度)の運動拘束化での検証を行う。

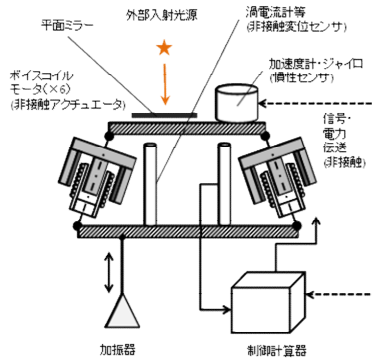


図4 提案する実験システム検証例

4. 研究成果

(1) 空間安定制御方式として、ステーブルプラットフォーム(SP)方式とストラップダウン(SD)方式の2方式を検討することとした。SP方式は、ペイロードの動揺を慣性センサで検知して、慣性センサの出力がゼロになるようにフィードバック制御をかける方式であり、センサは基本的に慣性センサのみで良い。一方、SD方式は、プラットフォームの動揺を慣性センサで検知して、その動揺を打ち消すようにプラットフォームを駆動するフィードフォワード方式であり、センサとしては慣性センサと相対センサの2つが必要である。SD方式は、ペイロード側にセンサが不要で完全非接触なシステムが構築可能であり、こちらが本研究の主眼であるが、絶縁性能はSP方式の方が優れていると考えられる。そこで、実験システムとしては両方試せるように慣性センサ(加速度計)をベース側・ペイロード側の両方に取り付け可能なようにシステムを設計した(図5)。

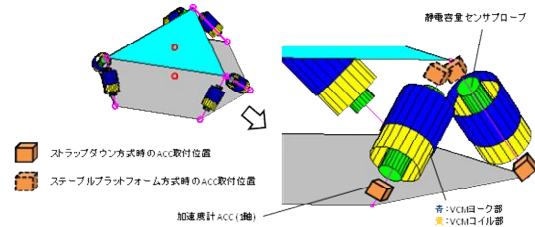


図5 センサとVCM配置例

(2) 実験システムはペイロード指向軸の最大角度変動を1 deg程度、分解能を1秒角で設計した。結果、非接触型変位センサの最小分解能は1 μm 、非接触アクチュエータのストロークは3 mm p-p程度必要である。変位センサの要求を6 CH、レンジ2 mm以上、分解能1 μm 以下、帯域DC~200 Hzと整理し、左記要求を満たすセンサ方式を静電容量型、渦電流型の各種センサからトレードオフし、精度とVCM耐磁性の観点から静電容量型方式を選定した。また、実験システムを構成するためのVCMヨーク、コイルのパラメータを決定した。次に、VCMシステム構成パラメータを検討し、図6及び表1の通り決定した。この値は、システムの面内-面外剛性比が1対1となり、軸方向が面内1方向に対して2倍強い。これは重力方向に支える力を大きくするためである。

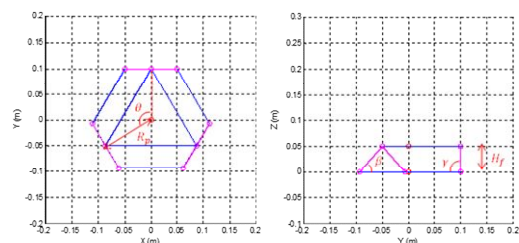


図6 VCMシステム構成

表1 VCMシステム構成パラメータ

VCMシステム構成パラメータ	値
ペイロード面中心からパイポッド取付点までの距離： R_p	100 mm
ペイロード面 - パス面間の高さ： H_f	50 mm
パイポッド取付点間隔： θ	120 deg
ストラットの傾斜角： β	45 deg
パイポッド面の倒れ角： γ	90 deg

(3) VCMのコイルとヨーク間の間隙を大きくすると指向ペイロードプラットフォームの可動変位域が広がるが、推力が間隙の3乗で低下する。そのため、ペイロード荷重に対する可動変位制限が発生する。VCMヨーク側が6自由度変位した際に、ヨークとコイルが接触してはならない要求を、ヨーク側を6自由度変位させた際のヨーク及びコイル縁断面を評価し、可動変位制限値を算出した(図7)。検討結果、間隙0.5 mmの場合、並進1 mm、回転0.5 degとなった。回転変位は目標とした1 deg程度より足りないが、今後VCM推力を実測し、最適化を図っていくことによって可動域を広げることが可能である。

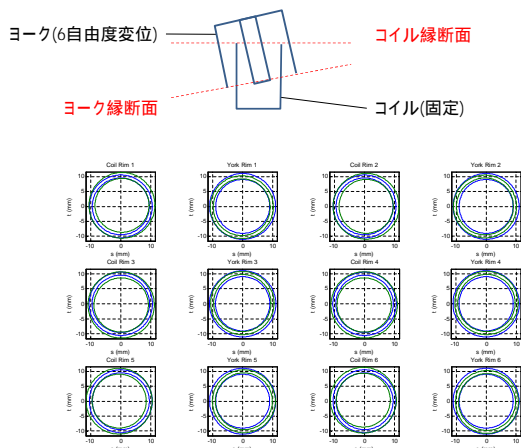


図7 VCM可動制限と変位例 (X+1.0 mm)

(4) ステータブルプラットフォーム方式とストラップダウン方式の両方式を試せるように、静電容量型非接触変位センサと非接触型ボイスコイルモータ(VCM)を6軸ストラット型に配置した、空間安定装置の設計・試作を完了した。試作結果、直径225 mm、高さ50 mm、全体1 kg以下のコンパクトな実験システムを構成することができた。装置外観を図8に示す。当初目的の実験システムを構築することができたので、このシステムを用いて今後、制御特性を評価する計画である。特にVCM推力周波数特性を把握することが必要であり、その結果によりどの程度の帯域までの擾乱が低減できるかが決まる。小型加振器

を用いて制振実験を行い、評価する予定である。

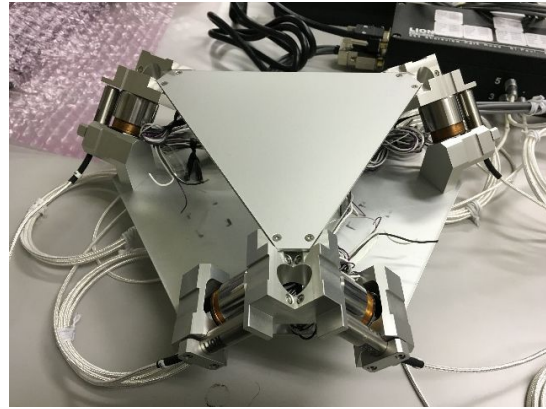


図8 試作した実験システムの外観

(5) また、静電容量型非接触センサプローブをVCMの同軸に配置可能な、中空型VCMの設計についても、本研究課題において検討した。設計した中空型VCMを図9に示す。VCMを貫通させるようにヨークを中空型とすると、磁束密度が減り推力を大きく減じる課題が判明した。そのため、中空型VCMで、非接触センサを非同軸に配置する構成を実験系のベースラインとすることとした。ただし、中空タイプのVCMに関しては、変位センサも含めた形状最適化が見込めるため、6軸実験システムとは独立に変位センサ付VCM1軸校正装置を試作した。設計結果と本装置を用いたVCMの校正方法概要を図10に示す。本装置は、変位センサとVCMを同軸に配置した構成の性能評価することが可能であり、中空タイプVCMの推力特性およびVCM同軸に配せられた静電容量型変位センサの計測精度を評価することが可能である。

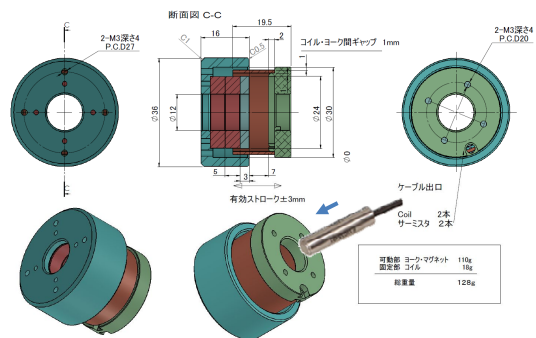


図9 中空タイプVCMの設計結果

