

令和元年6月24日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06060

研究課題名（和文）球面超音波モータを使った宇宙用アクチュエータの研究と設計開発

研究課題名（英文）Research and design development of space actuator using spherical ultrasonic motor

研究代表者

大橋 太郎（OOHASHI, TARO）

木更津工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：20259823

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、宇宙空間で用いている宇宙アクチュエータやスラスタを球面超音波モータに代替する「宇宙用球面超音波モータ」を開発することである。開発した宇宙用球面超音波モータの特性を調査するために、大気中において、モータのトルク、回転速度、トルクと回転速度の関係、耐久性や作動寿命を調査したのち、同様の実験を真空中において実験をおこなった。また、大気中において、高温環境と低温環境を構成し、各種の特性を調査する。両者の温度環境が繰り返しおこなわれると仮定した温度サイクル環境の実験をおこない、開発した宇宙用球面超音波モータが十分な機能を有することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ISS国際宇宙ステーション、小惑星探査機「はやぶさ」、月面探査機、宇宙移住計画に伴う宇宙エレベータ構想など、宇宙機の開発が検討されている。これらの宇宙機はロケットで宇宙空間に運ばれたのち、目的に応じて宇宙用アクチュエータが利用されている。主なものはステッピングモータやDCモータであり、超音波駆動をするモータの使用例はない。超音波モータは構造が簡単であるが低トルクという欠点があるが、宇宙空間では小さなトルクで十分実用化に耐えうる環境のため、好都合なモータである。実用化がすれば、画期的な研究成果となり、超音波モータは従来の宇宙用アクチュエータにとって変わることが十分に期待されるモータである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop "Space Spherical Ultrasonic Motor" which substitutes space actuator and thruster used in space with spherical ultrasonic motor. In order to investigate the characteristics of the developed spherical ultrasonic motor for space, after investigating the motor torque, rotational speed, the relationship between torque and rotational speed, durability and working life in the atmosphere, the same experiment in vacuum experiment was conducted. In addition, in the atmosphere, the high temperature environment and the low temperature environment are constructed, and various characteristics are investigated. We conducted experiments on a temperature cycle environment assuming that both temperature environments are repeated, and confirmed that the developed spherical ultrasonic motor for space had sufficient functions.

研究分野：機械工学

キーワード：設計工学 アクチュエータ 宇宙空間 圧電素子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

科学技術の進歩に伴い国内外で宇宙開発が活発におこなわれている。人工衛星や国際宇宙ステーションなどの宇宙機の姿勢制御にはスラスタが用いられている。運用後の宇宙機がスペースデブリにならないように、大気圏へ再突入させ焼却する方法や高高度へ軌道を修正する方法が提唱されており、廃棄の目的でもスラスタが用いられている。現在多くの宇宙機のスラスタは向きが固定されているため、宇宙機に複数個の設置が必要でペイロードを圧迫している。

2. 研究の目的

本研究では、スラスタの向きを自由に可変でき、複数個あるスラスタの機能を1つにまとめられ、少ない個数で冗長性を持たせることができる宇宙用多自由度アクチュエータ「球面超音波モータ (SUSM: Spherical Ultrasonic Motor)」を研究し、設計開発することである。

3. 研究の方法

基本特性試験として、回転数、トルク、耐久性における各測定的确立をおこなうため、SUSMの実験装置を作成した。作成した実験装置を用いて、大気中で回転数の測定をおこなう。運動に一番負荷のかかる駆動として、宇宙用 SUSM に(ステータ1、ステータ2、ステータ3)=(0度、60度、-60度)の各位相差をもった交流信号を印加し、Y軸正方向の繰り返し運動をさせた。その際の出力棒の運動をビデオカメラで撮影し、圧電素子の温度を熱電対で計測した。温度可変の恒温槽において低温域・高温域にさらした熱負荷実験をおこない、回転数、トルク、耐久性に関する実験をおこなう。

4. 研究成果

本研究では宇宙用のアクチュエータの代替としての宇宙用 SUSM を開発する。開発した宇宙用 SUSM を図1に示す。

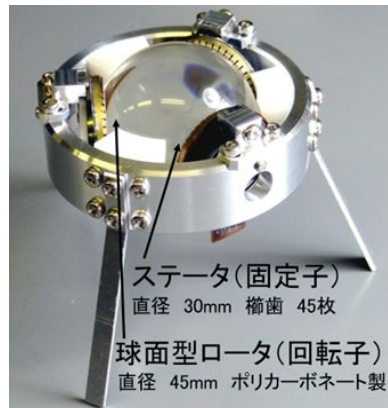


図1 開発した宇宙用 SUSM

図1に示す宇宙用 SUSM には、3つのステータと1つの球ロータを有している。ステータは直径 30 mm、櫛歯 45 枚であり、圧電素子と弾性体を接着剤で圧着して構成されており、球状に等間隔で配置されている。直径 45 mmの球ロータは実験環境により素材(ポリカーボネート材、ポリイミド材など)を変える。3つのステータと球ロータは均一に押し当てられているため、宇宙用 SUSM は3自由度を有するモータとして利用できる。3つのステータの動作を組み合わせることで運動に冗長性を確保し、一方向の駆動、軸の回転、複合運動などが可能となる。本研究では主に、図2に示す一方向駆動を採用し、実験をおこなう。

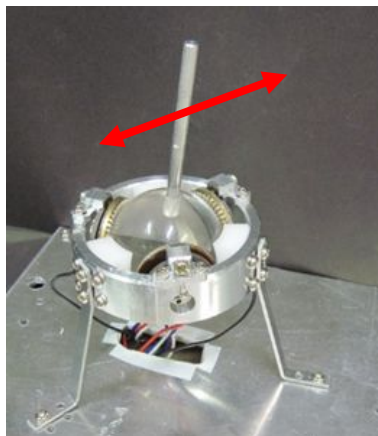


図2 一方向駆動をする宇宙用 SUSM

(1) 宇宙用 SUSM の基本性能試験

宇宙用 SUSM について、基本的な性能を測定する実験をおこなった。実験をおこなったのはトルク、周波数とトルク特性、トルクと回転速度特性、耐久性、寿命である。実験は全て大気中でおこなった。

宇宙用 SUSM の回転速度を計測するために、SUSM の球ロータに出力棒を取り付け、モータの動作を一方向（左右方向）に制限するために 2 本のガイドレールを取り付け、2 本のガイドレールの中に出力棒をはさみこむ。往復駆動する範囲は 106 度である。左右の正負方向へ交互に駆動させる理由は、この条件が SUSM にとって最も過酷な条件だからである。出力棒の様子をビデオカメラ（SANYO 製）を用いて測定する。撮影時のフレームレートは 30 fps である。回転速度はビデオカメラで撮影した映像のフレーム数から算出する。使用した球ロータの素材はポリカーボネート材である。実験の概要を図 3 に示す。モータに共振周波数を印加し、各ステータに印加する位相差は (1 ch, 2 ch, 3 ch) = (0 度、60 度、-60 度) とする。この位相差を印加することによって球ロータは一方向である左右方向として往復駆動する。測定は 7 回おこなっている。はずれ値を取り除くため、最大値と最小値を除き、算出した平均値を測定結果とした。実験結果を表 1 に示す。平均値で 74.2 rpm を観測した。

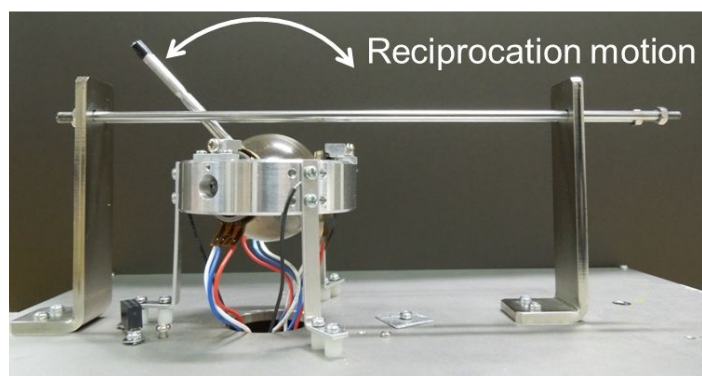


図 3 回転速度の測定実験

表 1 大気中での球ロータの回転速度

Rotational speed [rpm]	
Atmosphere	74.2

宇宙用 SUSM のトルクと回転速度特性を調べるために、分銅を用いる。球ロータの中心から出力棒 50 mm の位置にワイヤを取り付け、ワイヤをプーリに通して分銅をつり下げることで負荷を与え、負荷の大きさに対する駆動時の回転速度の測定をおこなう。実験装置を図 4 に示す。分銅のおもりは 0 g から 60 g まで 5 g 刻みで変化させた。回転角度は出力棒の稼働可能範囲である 106 度で、ビデオカメラのフレームレートは 30 fps である。回転速度はビデオカメラで撮影した映像のフレーム数から算出した。使用した球ロータの素材はポリカーボネート材である。実験結果を図 5 に示す。実験結果より、SUSM が低速域で高トルクであることを確認した。また、トルクと回転速度特性が線形近似でき、超音波モータが持つ垂下特性と同様の結果を得た。

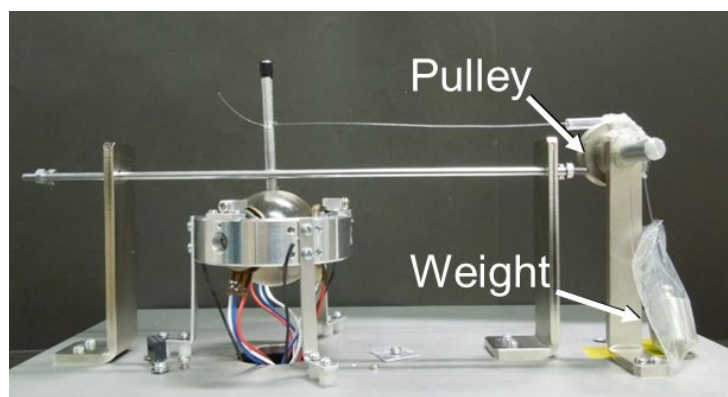


図 4 トルクと回転速度の測定実験

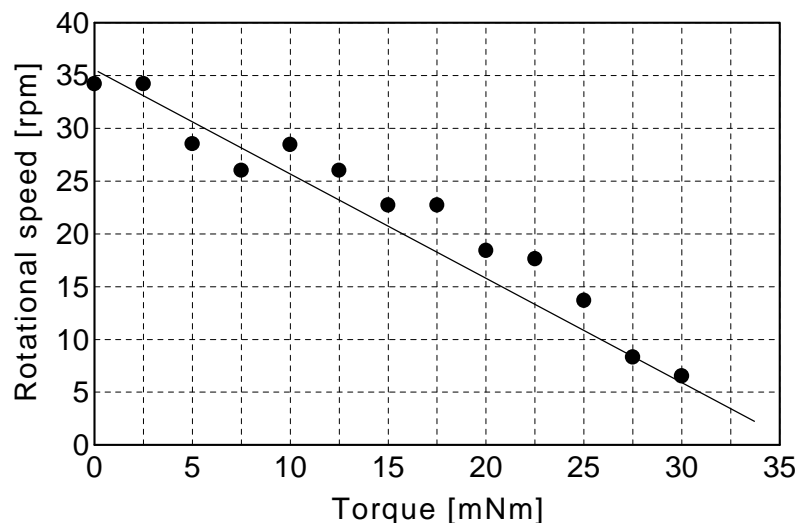


図5 トルクと回転速度の関係

(2) 真空中での宇宙用 SUSM の作動寿命測定

真空中での宇宙用 SUSM の作動寿命を調べるために、図 4 に示した実験装置を真空チャンバに入れる。大気中と同様に、負荷となる分銅のおもり 1 種類を使い、繰り返し駆動実験をおこなう。球ロータの中心から出力棒 50 mm の位置にワイヤを取り付け、ワイヤをプーリに通し、50 g の分銅を取り付けた状態で、繰り返し駆動実験をおこなう。最初は出力棒を直立の位置に保持し、5 秒間で左右方向の右方向へ駆動させる。右端に到達後、10 秒間停止させ、逆の左方向へ駆動させる。左端に到達後、10 秒間放置した後、右方向へ駆動させ、この繰り返し駆動をさせる。分銅を持ち上げることができなくなった時点で寿命とし、駆動回数の測定をおこなった。実験結果を表 2 に示す。表 2 より、真空中では駆動回数が 700 回を超えた。大気中では 300 回程度の駆動回数であったが 2 倍程度になった。真空中でこれだけの回数が達成できたのは、大気中で覆われていた汚れ、吸着分子、酸化物が真空状態で気化してなくなり、摩擦係数が高くなり、球ロータとステータ間に十分な摩擦力が得られた結果である。間欠駆動であれば温度変化が小さいため、圧電素子の圧電性を失うことなく駆動回数も多くなると考えられる。

表 2 大気中と真空中での宇宙用 SUSM の作動寿命

	Number of times
Atmosphere	321
Vacuum	758

(3) 高温環境における宇宙用 SUSM の評価

予備実験により、高温環境でも動作する N6 圧電素子と TB2285 接着剤を使用した新たな宇宙用 SUSM を製作し、熱負荷耐久性実験をおこなった。球ロータの素材を高温域に耐えられるポリアミド材に変更した。恒温槽内の温度を 120 に調節し、ステータ温度が槽内温度と等しくなるまで静置した後に、球ロータを 20 秒間駆動させた。なお、20 秒間の駆動はレールに沿って一定方向におこない、駆動休止時間を経た後の駆動時に圧電素子から生じた熱が完全に放熱されるよう、休止時間を 10 分間とした。実験結果を図 6 に示す。宇宙用 SUSM の熱負荷耐久性実験の結果、積算駆動時間の目標値である 70 分を達成することができ、90 分を超えても駆動し続け、停止することはなかった。この結果から、圧電素子および接着剤の選定により、宇宙空間で想定される 120 の高温環境下において人工衛星のスラスタに求められる駆動性能を満たすことができた。

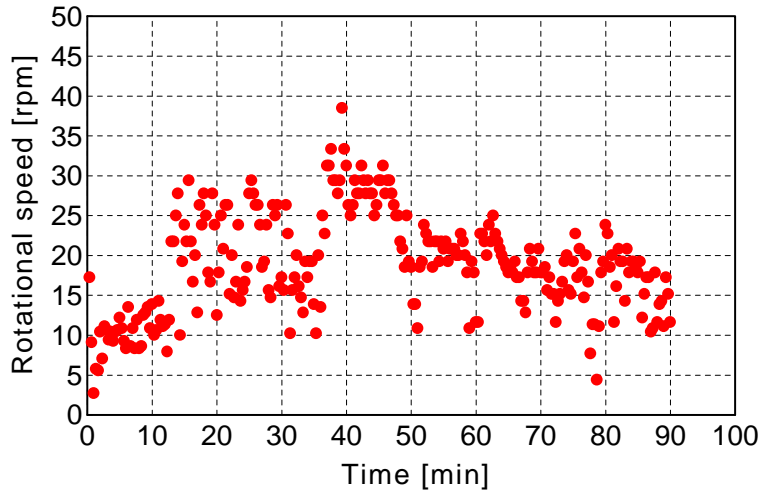


図6 宇宙用 SUSM の高温環境での動作結果

(4) 低温環境における宇宙用 SUSM の評価

恒温槽内部に入れた実験装置と恒温槽を、常温の 20 から -120 まで約 2 時間かけてゆっくり冷却した。恒温槽内が低温の状態である状態で常温の大気が内部に入ると恒温槽内で凍結が発生しやすくなるため、恒温槽の上下部にあいた穴を可能な限り密閉した状態で冷却した。以上の凍結対策を施し、-120 における宇宙用 SUSM の駆動実験をおこなった。しかしながら、以上の凍結対策を施したにも関わらず、-120 の実験では球ロータ表面が凍結し、十分な駆動ができなかった。運転当初は見られなかった結氷が、球ロータ表面に少しずつ付着していることが確認できた。そのため回転速度は低く、最終的に積算駆動時間の 6 分を越えたところで停止した。今後は凍結をせず、十分に駆動ができる低温度の -80 で駆動実験をおこなった。

恒温槽内部に入れた実験装置と恒温槽を、常温の 20 から -80 まで約 2 時間かけてゆっくり冷却し、実験をおこなった。図 7 に宇宙用 SUSM の -80 における回転速度の変化を示す。実験結果より、-80 の低温下では宇宙用 SUSM の積算駆動時間は 61 分 20 秒となった。時間が経過するにつれて、宇宙用 SUSM の回転速度が減少していき、61 分 20 秒で停止した。SUSM の耐久性を確認するため、宇宙用 SUSM を常温 20 に戻し、再び駆動実験をおこなった。回転速度が減少することなく、90 分間の積算駆動ができたことを確認し、90 分間で駆動を停止させた。この結果から -80 の低温環境において、圧電素子に熱衝撃による接着強さの劣化はないと考えられる。

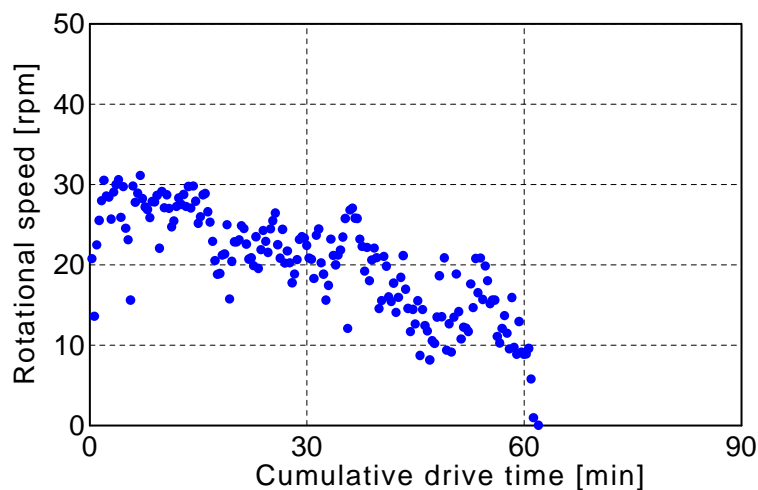


図7 -80 における SUSM の回転速度の変化

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Uichi Nishizawa, Taro Oohashi, Shigeki Toyama ,Evaluation of spherical ultrasonic motor for space in high temperature condition, Journal of Vibroengineering , 査読有 , Vol.18(2), 2016 , pp. 916-926

Uichi Nishizawa, Taro Oohashi, Shigeki Toyama ,Evaluation of spherical ultrasonic motor for space in low temperature condition, Journal of Vibroengineering , 査読有 , Vol.19(7), 2017 , pp.5170-5181

Uichi Nishizawa, Taro Oohashi, Shigeki Toyama , Evaluation of resistance against vibration and shock resistance on spherical ultrasonic motor , International Journal of Modeling and Optimization , 査読有 , Vol.8(2), 2018 , pp.68-73

〔学会発表〕(計2件)

Uichi Nishizawa, Taro Oohashi, Shigeki Toyama , Spherical ultrasonic motor for space , XII. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms 2016, (September 6-8, 2016, Czech Liberec)

Taro Oohashi, Uichi Nishizawa, Shigeki Toyama , Development of spherical ultrasonic motor for space. Evaluations of durability under low temperature environment and temperature cycle , The 22nd VIBROENGINEERING Conference, (October 4-7, 2016, Russia Moscow)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：西澤 宇一

ローマ字氏名：NISHIZAWA , Uichi

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：工学(系)研究科(研究院)

職名：産学官連携研究員

研究者番号(8桁): 80553221

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。