

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420819

研究課題名(和文)トラス構造の熱変形による高精度形状制御

研究課題名(英文)Precise shape control of truss structure by artificial thermal expansion

研究代表者

石村 康生 (ISHIMURA, KOSEI)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：10333626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：主構造に固定された細長いトラス構造に対して、人工的な熱変形による高精度ポインティング制御を実施した。具体的には、トラスの下端(固定側)の部材に熱を加えることで、長さを制御し、トラス向きの制御を制御した。トラス部材のジョイントを弾性ヒンジとすることで、ガタを無くしヒステリシスを小さくした。4mスケールのトラスに対して、制御機構を実装し、50秒角以上の可動域を1秒角RMSでの制御精度を実現した。

研究成果の概要(英文)：Precise pointing control was carried out for a long truss structure fixed with main body. The pointing was controlled by the artificial thermal expansion of truss members at the bottom of truss (fixed side). Elastic hinges were introduced to the truss in stead of pin joint because there is no gap in elastic hinges so that hysteresis of the mechanism was expected to be suppressed. We applied the pointing control system to a 4m extensible truss. As a result, the precise pointing accuracy, 1 arcsecRMS, and movable range, 50 arcsec, were confirmed through experiments.

研究分野：宇宙構造物

キーワード：熱膨張 形状制御 ポインティング トラス

1. 研究開始当初の背景

2015年度打ち上げのX線天文衛星 ASTRO-Hに代表されるように、観測精度の向上に伴って、衛星構造システムは大型化・高精度化の傾向がある。一方で、軌道上において10メートル規模の衛星構造をミクロンオーダーで維持するには、既存の構造・材料技術では十分では無い。軌道上における高精度構造物の実現に向けて、スマート構造/材料、インテリジェント構造、適応構造の開発といった取り組みは1980年代より盛んに行われ、各種成果を挙げているものの、実際の衛星への適用は進んでいない。地上では100個を超える油圧アクチュエータを有するすばる望遠鏡の鏡面形状制御システムなどが既にあるが、宇宙におけるすばる望遠鏡は未だ実現できていないのが実情である。要因の一つに、制御性能は高いものの、ハードウェアが複雑なものが多く、宇宙空間という極限環境における信頼性に課題があるという点が挙げられる。軌道上の構造システムの不具合の多くは、展開構造の摺動部など、機構部品において発生しており、機構部品を無くし単純なハードウェア構成とすることは信頼性の向上につながる。そこで、本研究では、ヒーター加温による部材の熱変形をアクチュエータとして利用し、高い信頼性の実現を目指す。軌道上における周期外乱に対する大型望遠鏡の支持構造の形状制御(形状保持)を目的として、トラス構造の制御を行う。熱を利用していることによる応答速度の問題とマイナスの入力が与えられない問題については、外乱の周期性に注目し、モデル予測制御を利用することで解を得る。

2. 研究の目的

次世代の宇宙科学や、より精緻な地球観測を支えるために、10メートル規模の観測機器の支持トラス構造をミクロンオーダーで形状制御制御可能な、革新的な構造システム及び制御システムを構築することが研究目的である。数年後の実衛星プロジェクトへの成果還元も視野に入れ、機構部品を用いないシステム構成とする。鍵となる技術は、人工的な熱変形の利用と周期外乱に対するモデル予測制御である。ヒーター加温による部材の熱変形をアクチュエータとして利用する一方で、冷却ができないという問題点を、モデル予測制御によってカバーする。さらに、これらの研究過程で熱構造システムの設計手法を開発する。

3. 研究の方法

ヒーター加温による人工的な熱変形とモデル予測制御を用いることで、トラス構造の高精度形状制御の実現を試みる。具体的には、既存のメートル規模のトラス構造を用いて、制御性能の実証を行う。[課題1] 実機による形状制御実証(大気中)。1.9mのトラス構造を対象に、トラス下端に対する上端の位置

制御を行う。各部材にヒーターを取り付け、ヒーターの出力制御によって各部材の熱膨張を制御する。ここでは、構造物の軌道上での形状変化として、熱変形といった周期外乱を想定し、モデル予測制御を用いて形状制御を試みる。形状計測には、外界からのレーザー変位計を用いると同時に、軌道上での変位計測を想定し、過去の研究において開発した対象構造システムに固定できる内界センサも用いる。各種周波数成分を有する外乱に対して、本制御システムによる形状維持性能を評価する。特に構造数学モデルのモデル化誤差に注目し、構造システムの同定精度の影響を評価する。

[課題2] 真空環境下における制御性能評価と段階的に性能を評価することで、構造数学モデル、熱数学モデルのそれぞれのモデル化誤差の影響を明らかにする。まず、軌道上での制御性能を評価するために、自然対流の影響が無い真空環境下での制御性能の評価を行う。自然対流が無く輻射が支配的になるため、大気中と比べて冷却の時定数が伸びる事が予想される。このシステムの熱特性の違いが制御性能に与える影響を評価すると同時に熱数学モデルのモデル化誤差の影響を評価する。評価試験は、JAXA保有の真空チャンバーを利用して行う。

最後に、これらの課題1,2で得られた各種環境下での制御性能の評価結果を基に、システムの同定精度を向上させ、モデル化誤差の低減を図る。これらの研究成果をもとに、制御性能向上を実施する。

4. 研究成果

まず、1.9メートルのトラス構造を対象に、トラス下端に対する上端の位置制御を大気中で行った。トラスの各部材にヒーターを取り付け、ヒーターの出力制御によって各部材の熱膨張を制御した。構造物の軌道上での形状変化として、熱変形といった周期外乱を想定し、モデル予測制御を用いて形状制御を試み、数ミクロンメートルのオーダーで形状制御が可能であることを確かめた(図1)。ただし、可動域の拡大を試みたところ、熱応力による部材の損傷が確認され、弾性ヒンジの適切な設計開発が重要であることが判明した。

本研究では、人工的な部材の熱膨張をアクチュエータとして利用し、摺動部がない高い信頼性を有するシステムとしている。一方で、モデル予測制御を用いるためには、このアクチュエータを含めたシステム同定精度が重要である。部材内部の予期せぬ温度ムラは、制御精度を著しく悪化させることが判明したため、部材の温度一様性の改善を試みた。具体的にはヒートパイプを部材として採用し、従来のアルミパイプを用いた場合と比較して、温度一様性が改善されることを確かめた(温度ムラが、10%→4%へ低減)。次に、真空環境下での熱膨張アクチュエータの放熱

性能の向上のために、ラジエータを付与した。一方で、このラジエーション機能は、放熱時には有効であるが、加熱時にはむしろ逆効果である。そのため、加熱時のヒーター電力の低減および応答速度維持のために、ラジエーション部とまでの熱コンダクタンスを可変とする可変コンダクタンスヒートパイプの利用を行った(図2)。その結果、系全体に与える熱量が一定でも、コンダクタンスを変えることで、10~40%程度の温度上昇量の改善が実現できることが確かめられた。一方で、放熱に関しては、ヒートパイプの潜熱の影響が大きいことが判明した。

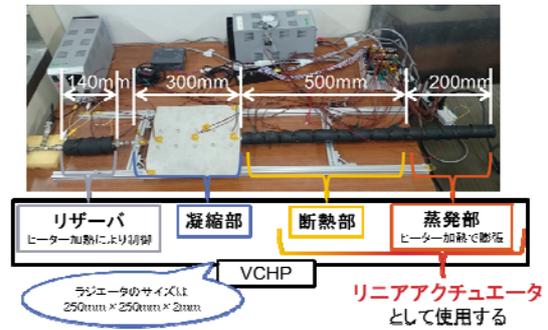
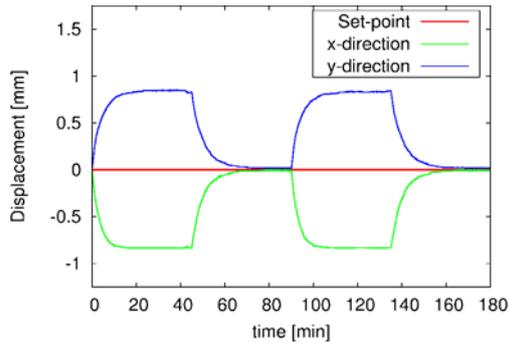


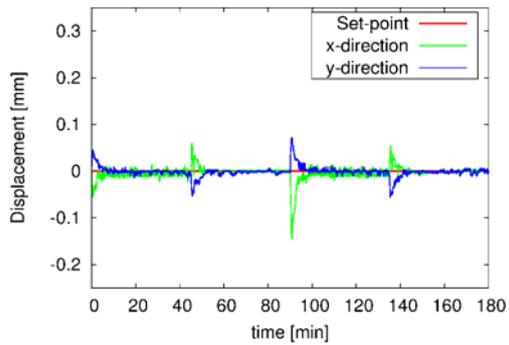
図2 可変コンダクタンスヒートパイプ

軌道上における性能のフィージビリティスタディとして、可動域、必要電力、応答速度の3つの観点での評価を行った。軌道上での高温・低温ワーストの条件下で、当初想定である10m規模のトラス構造先端での1mmの可動域に対して、数十ワットの電力で実現できる見通しを得た。さらに、応答速度に関しては、ヒートパイプではないアルミ合金製の熱膨張アクチュエータであれば、適切に基準温度を設定することで、軌道周期に対して、5%以下の十分短い時間での応答が可能である見通しを得た。

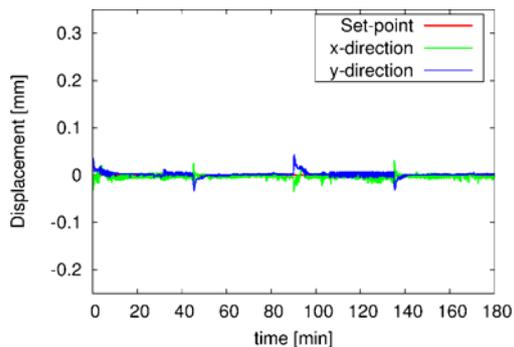
次に、スケールモデルを用いて、熱真空環境下での熱光学特性を試験評価した(図3)。熱数学モデルとの比較を行い、熱真空環境下での温度維持のための電力や応答速度がフィージブルであることが確かめられた。また、弾性ヒンジ部およびトラス部材の接触部の熱伝導特性において不定性が大きく、これらの詳細のモデル化が次のステップの課題であることが判明した。



(a) 制御無しの場合 809 μ mRMS



(b) PI 制御の場合 18 μ mRMS



(c) モデル予測制御の場合 8 μ mRMS

図1 トラスのポインティング制御結果

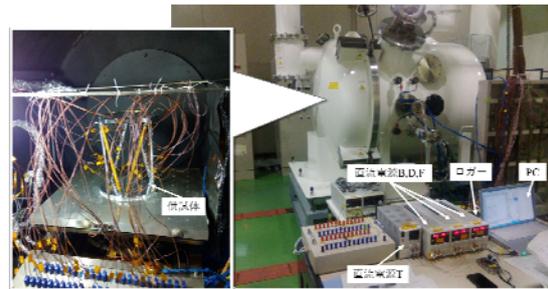


図3 熱真空試験モデル

最後に、軌道での利用を想定した内界センサ(レーザー光源と Positioning Sensing Device を用いたシステム)を本制御機構に統合し、4m規模の伸展トラスに対して、ポインティング制御を実施した。可動域、応答速度、制御精度について、トータルシステムとしての性能評価を行い、50秒角以上の可動域の実現、大気中ではあるが3分間以内での50秒角の変動、約1秒角RMSでの制御精度の実現ができた(図4)。

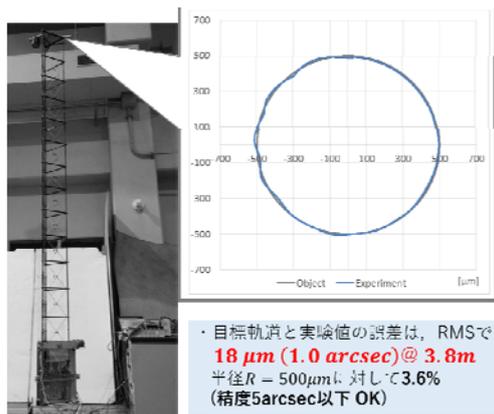


図4 伸展トラスのポインティング制御

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Yusuke Funakoshi, Kosei Ishimura, Yoshiro Ogi, Takashi Iwasa, "Application of Preview Information to Pointing Control of Truss Structure Using Artificial Thermal Expansion on Orbit," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, No. 26, 2014, pp. 730-739.

② Kosei ISHIMURA, Kenji MINESUGI, Taro KAWANO, Atsushi WADA, Kazunori SHOJI, Mizuho IKEDA, Kuniyuki OMAGARI, "Novel Technique for Spacecraft's Thermal Deformation Test Based on Transient Phenomena," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2014, No. 12(ists29), pp. 29-34.

[学会発表] (計12件)

①石村康生、仙場淳彦、秋田剛、鳥阪綾子、田中宏明、山川宏、宮下朋之、河野太郎、馬場満久、小川博之、岡崎峻、嶋田岳史、旗持天, "高精度伸展式光学架台の現状と研究課題について", 第32回宇宙構造・材料シンポジウム, 2016/12/9, 相模原.

②旗持天, 石村康生, 山川宏, "伸展トラスの周波数応答特性の入力振幅依存特性," 第32回宇宙構造・材料シンポジウム, 2016/12/9, 相模原.

③嶋田岳史, 石村康生, 小川博之, 岡崎峻, "熱膨張アクチュエータの熱真空環境下における熱特性評価," 第32回宇宙構造・材料シンポジウム, 2016/12/9, 相模原.

④ Takeshi Shimada, Kosei Ishimura, and Taro Kawano, "Demonstration of a novel smart structural system for pointing control of trusses," ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS), 2016/9. 28-30, Stowe, VT, US.

⑤嶋田岳史, 石村康生, 河野太郎, "大型トラス構造物の高精度ポインティング制御特性の実験的評価," 宇宙科学技術連合講演会講演集 60, 6p, 2016/9/6. 函館市.

⑥嶋田岳史, 石村康生, 山川宏, "伸展トラスのポインティング制御機構のヒステリシス及び制御精度評価," 第58回構造強度に関する講演会, 2016/8/3, 札幌, pp. 4-6.

⑦石村康生, 田中宏明, 荻芳郎, 前田修, 阿部和弘, 馬場満久, "キネマチックカップリングのラッチ完了条件と再現性向上にむけた考察," 第58回構造強度に関する講演会, 2016/8/3, pp. 84-86. 札幌市.

⑧嶋田岳史, 石村康生, 小山遼, 山川宏, "熱変形を利用した高精度ポインティング制御機構の設計." 第31回宇宙構造・材料シンポジウム, 2015/12/8. 相模原.

⑨飯野晶, 岡崎峻, 秋田剛, 石村康生, 山川宏, 小川博之, "可変コンダクタンスヒートパイプを用いた熱膨張アクチュエータの基礎特性評価" 第31回宇宙構造・材料シンポジウム, 2015/12/8. JAXA 相模原キャンパス.

⑩Hiraku Sakamoto, Hiroaki Tanaka, Kosei Ishimura, Akihiro Doi, and Yusuke Kono, "Shape Control Experiment of Space Reflector for Extremely High Frequency Radio Astronomy," the 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 2015/10/14, Kobe, Japan.

⑪石村康生, 山川宏, 飯野晶, 小山遼, 岡崎峻, 小川博之, 河野太郎, 船越裕亮, 秋田剛, 仙場淳彦, "光学架台の高精度ポインティング制御の基盤技術開発", 第30回宇宙構造・材料シンポジウム" 2014/12/1, JAXA 相模原キャンパス.

⑫秋田剛, 石村康生, 高木亮治, "過渡データを利用した効率的な熱特性推定法に関する研究," 2014年度日本機械学会年次大会, 2014/9/9, 東京電機大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石村 康生 (ISHIMURA Kosei)

宇宙航空宇宙研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号: 10333626