

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00280

研究課題名(和文)大型地球観測センサを可能とする光学計測と構造制御の融合

研究課題名(英文)Optical and Structural Study of Large Remote Sensing Telescope

研究代表者

岩崎 晃 (Iwasaki, Akira)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：40356530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,590,000円

研究成果の概要(和文)：自然災害の増加に伴い、静止軌道からの常時高分解能地球観測に期待が高まっているが、低軌道衛星と比較して60倍ほど軌道高度が高くなるため、観測機器が大型化し、それを対象とする構造制御の高精度化は喫緊の課題である。既存の70cmセラミック主鏡に対し、波面計測手法および構造制御手法を組み合わせ研究を行った。1m級ステュワートプラットフォームを構築し、並進制御範囲10～90 μm に対し $\pm 70\text{nm}$ 、回転制御範囲 $\pm 50\text{arcsec}$ に対し $\pm 0.5\text{arcsec}$ を達成した。波面計測では、光軸傾き 2arcsec の精度を達成した。組み合わせ試験では、波面収差が最小になるように制御すること、およびその再現性が検証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

静止軌道からの常時高分解能地球観測においては大型望遠鏡が必要となるが、構造制御において、目標精度/基準長なる指標に対し10のマイナス8乗オーダーを達成できたことで、実現性の目途が立った。また、簡易な波面計測が可能となったことで、組み込み計測の可能性も広がった。自然災害の際に、常時観測を可能とする技術要素が確立したことで、災害・環境汚染や農林水産業などの即時性を必要とする分野でのデータ利用に貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：With the increase in the number of natural disasters, there are high expectations for constant high-resolution Earth observations from geostationary orbit; however, the orbital altitude is 60 times higher than that of low-earth orbit satellites, resulting in larger telescopes and the urgent need for more accurate structural control of these instruments. A combination of wavefront measurement and structural control methods was studied on an existing 70 cm ceramic primary mirror, and a 1 m class Stewart platform was constructed to achieve an accuracy of 70 nm for a translational control range of 10-90 microns and 0.5 arcsec for a rotational control range of 50 arcsec. In wavefront measurement, an accuracy of 2 arcsec of optical axis tilt was achieved. Combination tests verified the control to minimize wavefront aberration and its reproducibility.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：大型望遠鏡 構造制御 光学測定 ストラット

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国における大型自然災害の発生件数が増えており、宇宙からの地球観測に対する要求が高まりつつある。戦略的イノベーション創造プログラム『国家レジリエンス(防災・減災)の強化』においては、発災から2時間以内の衛星データ提供が求められている。被災状況の早期把握のための衛星観測は宇宙基本計画工程表にも記載されているが、現段階ではベストエフォートレベルに過ぎない。これは、低軌道の衛星群を用いているため、撮像・伝送シーケンスを任意のタイミングかつ短時間で行うことには限界があることによる。

このような中、世界各国では静止軌道に配置した地球観測衛星を用いて、準リアルタイムの観測を行う計画が開始されている。2015年に打ち上げられた中国のGaofen-4衛星は、静止軌道から50mの解像度を達成した。欧州では10mの解像度を有するGeo-oculusが検討されている。類似の検討は、インドや米国でも実施されており、新しいフェーズに入った。

静止軌道を用いる場合、低軌道衛星に比べ約60倍遠方から観測することになるため、必然的に大型の光学望遠鏡が必要となる。ミッション要求から、軌道上において大型の構造物を光の波長の20分の1レベルという高精度で運用することが求められる。日照日陰時の温度変化は、大型の構造物に不均一かつ異方的な歪みを発生させる。また、大型構造物は軽量化のために、地上においては重力的に歪んだ状態に限定され、軌道上での状態を地上で実現することは困難であるため、地上試験を行うにも数学モデルが唯一の方法である。

以上のような学術的背景のもとに、柔軟な大型構造物の状態を観測機器自身に内蔵した計測機器で推定できるのか、数学モデルを介してスマート構造要素を精密に制御することで、ミッションである光学結像の最適化まで実現できるのか、研究課題の核心をなす学術的「問い」である。

2. 研究の目的

自然災害の増加に伴い、静止軌道からの常時高分解能地球観測に期待が高まっている。しかしながら、低軌道衛星と比較して60倍ほど軌道高度が高くなるため、観測機器が大型化し、それを対象とする構造制御の高精度化は喫緊の課題である。本研究では、観測機器側の自己完結型光学計測手法および構造側の高精度スマート構造制御手法の基盤を築き、両者の技術を融合させることで、上記の課題を解決することを目的とする。観測側および構造側の数学モデルを媒介とすることで、両者の因果関係を明確にし、既存の70cmセラミック主鏡を用いた実験を通じて実証する。

研究においては、①観測機器の主要部分である大型望遠鏡自身を計測する新しい光学計測手法を実証し、観測機器内で光波波面を自己完結的に計測する技術を確認する。これにより、20分の1波長以下の精度で観測機器の波面特性を把握する。②構造体に計測系とアクチュエータを組み込み、精密制御を行うための機構を作製し、変位制御精度として、目標精度/基準長 $\sim 10\text{nm}/1\text{m} \sim 10^{-8}$ オーダーを達成する。これは、過去実績の、 $100\text{nm}/0.4\text{m} \sim 10^{-7}$ オーダーを1桁上回るものである。③観測機器側の計測結果は直ちに構造制御へのフィードバックに使えるわけではない。従って、観測機器と構造体の数学モデルを介し、変位制御量を推定するアルゴリズムを構築する。数学モデルとして、厳密モデルと簡易モデルを用意し、観測機器と構造系を融合して運用するための指針を示し、大型鏡を用いて実証する。④従来の『構造体単体の温度制御』から『観測機器の計測によるフィードバック』へのパラダイムシフトにより、ミッションを成立するための体系化を行う。

3. 研究の方法

従来、衛星の構造はバス機器として、ミッション機器を搭載する場として扱われてきた。一方、観測機器はミッション機器として、安定したバス機器の上に搭載する設計がなされている。大型かつ高精度なミッションを行うためには、もはや両者を別々に構築しても、システムとしては不成立である。したがって、『いかに調整点からずれないか』から『ずれても正しく調整できる』への戦略転換が必須である。本研究は、観測機器の光波計測とスマート構造とを組み合わせることで、大型構造物を制御し、ミッションとしての高精度かつ安定した結像を達成するものである(図1)。

これまで大型構造物の位置制御のために、スマート構造の研究が進められてきた。これは、構造物の中に計測機能と制御機能を導入することで、知覚、判断および応答の機能を持たせようとする総合技術である。しかしながら、宇宙ミッションの高度化によって、『単なる焦点調節』から『波面制御』への移

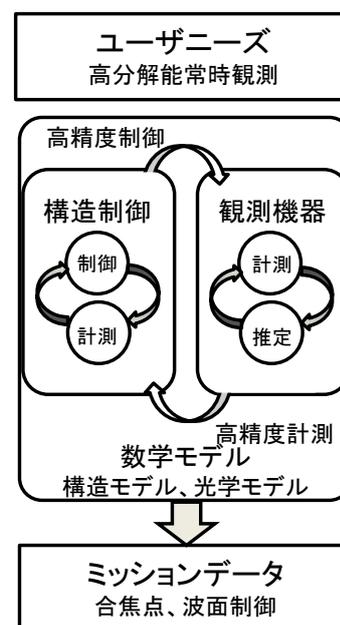


図1. 本研究の構想

行が求められ、構造物に埋め込まれた計測機能ではユーザー側が求める精度を満足できない場合が増えつつある。

このような問題を克服するために、より精度の高いミッション側の計測機能を構造系にフィードバックすることによって、構造制御をミッション要求レベルにブーストし、静止軌道からの高解像度観測への指針を示すことが本研究の創造性である。同時に、全システムが宇宙空間たる孤立空間で成立するハードウェアを構築する必要がある。このために、スマート構造体の構築、光シャワー法による観測機器内での自己完結型高精度計測を組み合わせる独自のハードウェア構築を行う。同時に、スマート構造での計測結果と観測機器での計測結果を結びつけるために、数学モデル解析を用いたシステム化を行う。

4. 研究成果

(1) 構造制御系の構築

宇宙望遠鏡の結像のためには、主鏡と副鏡の間の支持構造を制御し、適切な焦点位置を維持ことが求められる。軌道上の過酷な環境の下で高い寸法安定性を実現するために、センサを構造に統合した変位測定干渉計システムを構築した。この目的のために、レーザを用いるファブリペロー変位センサをストラットの端に組み込んだ。このことで、トラスの変位を精密に計測できる。提案手法の性能を検証するために、2種類のトラスストラットに対して、熱膨張の測定を実施した。ステンレス鋼および低熱膨張セラミックの熱寸法安定性を評価し、従来のレーザ干渉方式の測定システムと比較した。本手法は従来の測定システムと同様の精度を持ち、構造に組み込んだ形で運用できるため、軌道上でも適用可能な測定システムを提供できることが判明した。

次に、光学系支持構造に刻一刻と生じる微小変形をモニタリングし、それを軌道上でリアルタイムに補正する高精度構造制御技術を検討した。これはスチュワートプラットフォームの光学系支持構造であり、その構成部材を変位補正ストラットとする。本研究では70cm級セラミック鏡(球面中心120cm)を剛性の高いベースプレート上にキネマティックマウントを介して支持した。このベースプレートを基点として6本の変位補正ストラットにより1m級のスチュワートプラットフォームを構成し、CFRP製の副鏡支持パネルを支持した。実際の望遠鏡構造ではこのパネルは副鏡を搭載するための剛な平板であり、変位補正ストラットを制御することで主鏡-副鏡間の並進および回転の位置関係を制御することを想定する。

変位補正ストラットはその長さが1.5mであり、基本構造となるパイプ部材、長さ変化を常時モニタする変位計、長さ変化を補正するアクチュエータなどから構成される。パイプ部材にはCFRPを採用し、宇宙機構造として求められる高比剛性と熱変形を本質的に抑制する思想を踏まえた設計とした。本研究では、変形補正ストラット単体の変位検知・制御機能の検証を試み、10~90 μm の制御目標に対し $\pm 5\text{nm}$ の制御精度を達成できた。また、過渡的な温度条件下でも変位制御が良好に機能することが確認された。さらに、変位補正ストラットを6本組み合わせたスチュワートプラットフォームにおいて、協調的に変位補正制御を実施するための多軸変位制御プログラムを開発し、小型モデルにてその動作検証を行った。その結果、想定通りの動作をすることを確認した。

最終試験として、変位補正ストラットを制御することで光学系支持構造(主鏡-副鏡間)の並進および回転の位置関係の制御機能を検証した(図2)。その結果、副鏡支持パネルが設計通りに6自由度(3方向併進、3方向回転角)の動作を行うことが可能であり、並進制御範囲は10~90 μm の制御目標に対し $\pm 70\text{nm}$ の制御精度、回転制御範囲は $\pm 50\text{arcsec}$ の制御目標に対し $\pm 0.5\text{arcsec}$ の制御精度を達成した。これらには外部計測系の変動誤差(治具の熱変形など)も含まれているものの研究目標である目標精度/基準長について、 10^{-8} オーダーを達成できた。

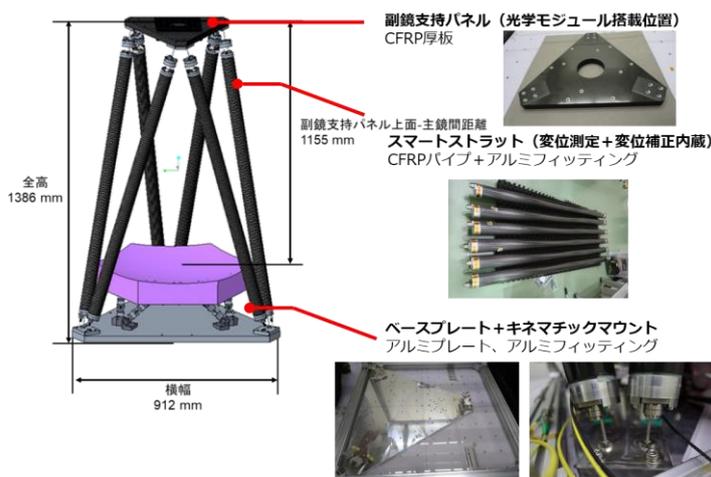


図2. 構造制御系の構成

(2) 光学測定系の構築

大型望遠鏡に対して、光シャワー法を導入するための光学系の検討を行った。半導体レーザ光を主鏡の球面中心に設置した光ファイバー端から射出することで、望遠鏡からの反射光を得て、そのビーム特性の評価から波面を求める手法を実現するセンサを設計した。ただし、本研究で用いる主鏡は通常の望遠鏡に比べて焦点距離が短いため、光ファイバーから射出する光では、十分

な開口数 (NA) が得られないため、リレー光学系が必要である。従って、光ファイバー端面から出射した光をコリメート光にした後に、凸レンズで 70cm 級セラミック鏡に投影し、反射光の変化を波面センサ (シャックハルトマンセンサ) で検知するものである。また、シャックハルトマンセンサの代わりに、いくつかの部品を交換することで干渉計に変えられることも確認した。

光学系支持構造に組み合わせるため、キューブ光学系をコアに光学部品を一体化し、移動可能な光学系とした (図 3)。また、上部からの部品落下により主鏡を損傷しないよう、操作を容易にする構造とした。最終的に測定を行う主鏡に蒸着がなされていないことから、同様の小型反射鏡を対象とした測定を行った。当初は迷光の影響が大きかったため、光学部品の配置等の再検討を行うとともに、アイリスを設置することで、迷光の影響を大幅に軽減することができた。これによって、小型反射鏡の特性が得られることを明らかにした。得られた波面収差をゼルニケ多項式に展開し、その検出感度を求めた。

最終的な、大型主鏡の波面計測においては、ゼルニケ係数のうち光軸方向並進 (デフォーカス) は $50\mu\text{m}$ 程度、光軸垂直面内並進 (シフト) は $1\mu\text{m}$ 程度、光軸傾き (チルト) は 2arcsec 程度の検出が可能であった。光学シミュレーションからは、集光用のレンズによる球面収差が若干残ることが示唆されたが、本研究を進める上で問題にならないレベルであることも確認した。

(3) 構造制御系と波面測定系の融合

構造制御系と波面計測系との融合においては、副鏡支持パネル上に波面計測装置を設置して波面収差を測定し、ゼルニケ多項式に展開して感度係数を求めた。検証用テストベッドに設置した 70cm 級セラミック鏡に対する位置を適切に定めることで、すべてのゼルニケ係数が 0 に近づくことを確認した。最終的に、テストベッドの変位補正ストラットを波面収差が最小になるように制御することで主鏡-副鏡間の並進および回転の位置関係を最適位置に制御可能であることが実証できた。図 4 は、テストベッドを傾けた際に、X 成分の光軸傾き (チルト) を測定したものである。また、最適位置からずらした検証用テストベッドを最適位置に戻した際の再現性も検証できた。

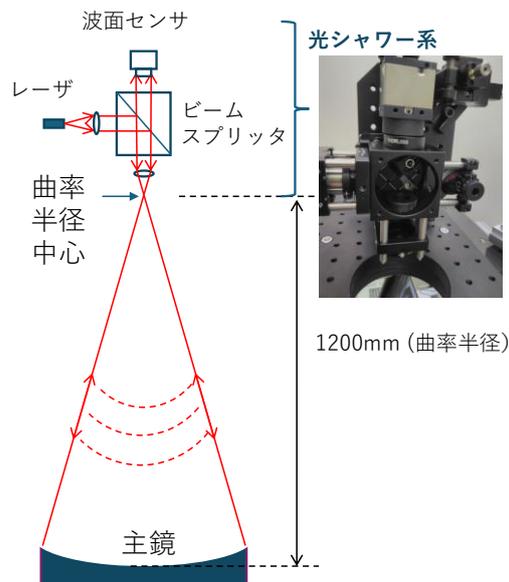


図 3. 構造制御系の構成

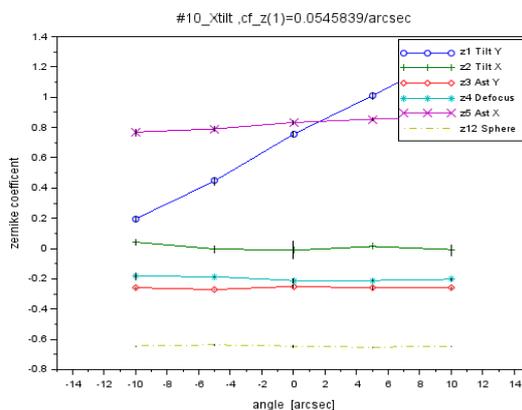


図 4. テストベッドの傾きに対する波面測定の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K. Kitamoto, T. Kamiya and T. Mizutani,	4. 巻 2
2. 論文標題 Evaluation of dimensional stability of metering truss structure using built-in laser interferometric dilatometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Eng. Res. Express	6. 最初と最後の頁 45023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2631-8695/abc9cf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水谷忠均	4. 巻 86
2. 論文標題 人工衛星による高精度観測のための構造安定化技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 934-937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.86.934	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 互井梨絵, 北本和也, 羽森仁志, 水谷忠均, 川島高弘, 岩崎晃
2. 発表標題 構造制御と光学計測の融合に向けた技術実証試験
3. 学会等名 第65回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北本 和也, 互井 梨絵, 羽森 仁志, 水谷 忠均, 川島 高弘, 岩崎 晃
2. 発表標題 大型光学望遠鏡システムのためのスマート安定構造の研究
3. 学会等名 第66回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 R. Tagai, K. Kitamoto, H. Hamori, T. Mizutani, T. Kawashima, A. Iwasaki
2. 発表標題 High-precision real-time displacement control for large optical system structure
3. 学会等名 Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 互井梨絵, 北本和也, 水谷忠均, 岩崎晃
2. 発表標題 大型光学系構造の高精度リアルタイム変位制御
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎晃, 水谷忠均, 木村俊義
2. 発表標題 災害への光学センサの貢献と課題-常時静止光学衛星を中心にして-
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村俊義, 水谷忠均, 白澤洋次, 佐藤世智, 高橋陪夫, 沖一雄, 岩崎晃
2. 発表標題 静止光学衛星の利用と概念検討
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷忠均, 佐藤世智, 松本純, 柳瀬恵一, 北本和也, 上野遥, 草部将吾, 桑田綾香, 木村俊義
2. 発表標題 衛星搭載用分割望遠鏡に必要な技術
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://webpark2258.sakura.ne.jp/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水谷 忠均 (Mizutani Tadahito) (00401232)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹 (82645)	
研究分担者	木村 俊義 (Kimura Toshiyoshi) (20399546)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・上席研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------