

A01 光学架台の高精度ポインティング制御の基盤技術開発

石村康生 (ISAS/JAXA), 山川宏, 飯野晶, 小山遼 (早大),

岡崎峻, 小川博之, 河野太郎 (ISAS/JAXA), 船越裕亮 (JAXA), 秋田剛 (千葉工大),

仙場敦彦 (名大), 大型高精度光学架台の研究メンバー

Kosei ISHIMURA (ISAS/JAXA), Hiroshi YAMAKAEA, Akira IINO, Ryo KOYAMA (Waseda Univ.),

Shun OKAZAKI, Hiroyuki OGAWA, Taro KAWANO (ISAS/JAXA), Yusuke FUNAKOSHI (KSC/JAXA),

Takeshi AKIATA (Chiba Inst. Tech.), Atsuhiko SENBA (Nagoya Univ.),

Members for R&D of Large and Precise Optical Bench

1. はじめに

現在、電波からガンマ線にいたるまでの様々波長で科学衛星による天体観測がなされているが、更なる成果達成のためには、観測システムの性能向上が必要である^[1]。例えば電波アンテナであれば、主要性能の一つである分解能は、観測波長/開口径 に比例し、性能向上のためにはより大型かつ高精度なアンテナの開発が渴望されている^[2]。これらの要求に応えるためには、アンテナ鏡面などの天体観測機器そのものに限らず、観測機器を支持する支持構造(架台)も高精度なものが必要である。そこで、本研究では、天体観測衛星における架台の高精度化を対象とする。

架台に要求される主要機能は、機器間の相対的な位置と姿勢の維持であるが、ここでは特に相対姿勢(ポインティング)を対象とする。具体的なシステムとしては、図1に示すような両端に望遠鏡のミラーと検出器が配置されているトラス光学架台を想定する^[3,4]。2015年度打ち上げ予定のASTRO-Hは、このような構造様式の代表例である^[5]。システム全体の指向制御は衛星の姿勢制御系によるものとし、ここでは、トラス光学架台のボトムに対するトップの変動(図1、式(1))の抑制を対象とする。

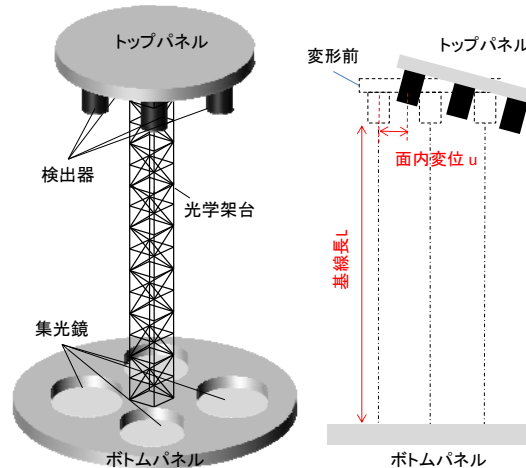


図1 光学架台とポインティング

$$\delta_{\theta} = \frac{u}{L} \quad (1)$$

ここで、 u は面内変位、 L は基線長(図1)である。このポインティング変動(式(1))を一定の範囲内に保つためには、大型構造物では特に熱変形をどう抑制するかが重要なポイントである。従来は、CFRPなどの低熱歪材の適用によって対処されてきたが、精度/サイズの要求が $1e-7$ 以下といった次世代の大

型高精度光学架台への厳しい要求に対しては、構造物が軌道上において自分自身の形状をセンシングし、制御を行なうスマート構造システムの導入が必要である^[6]。そのため、著者らは近年、高精度光学架台のポインティング制御システム（図2）を開発しており^[3,4]、本報告は、特にその計測システムと駆動機構システムの開発状況を示すものである。

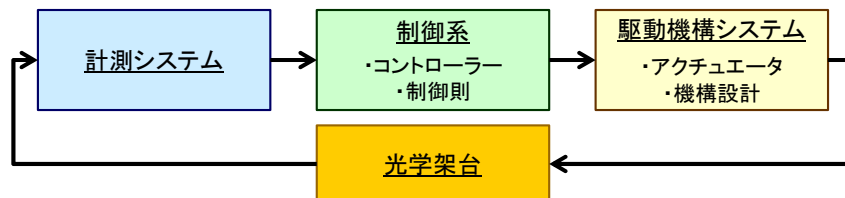


図2 高精度光学架台のポインティング制御システム（システムブロック図）

2. 高精度変位計測システム

本研究で対象とするポインティング制御において、計測すべきものは、トップパネルとボトムパネルの相対的な面内変位である。大型光学架台の計測においては、数メートルを越える基線長 L に対応できる計測機器が必要である。地上であれば大型治具などに固定されたレーザー変位計によってこれらの計測は可能であるが、軌道上での使用を想定すると、大型治具の利用は現実的ではない。そこで、我々は大型治具を必要とせず、作動距離が長く、マイクロオーダーの変位が計測可能な高精度計測システムを開発した。基本原理は、レーザー光源から射出されたレーザー光の位置を PSD (Positioning Sensing Device) で計測するというものである（図3）。光学架台に直接固定することで、治具を必要としない。

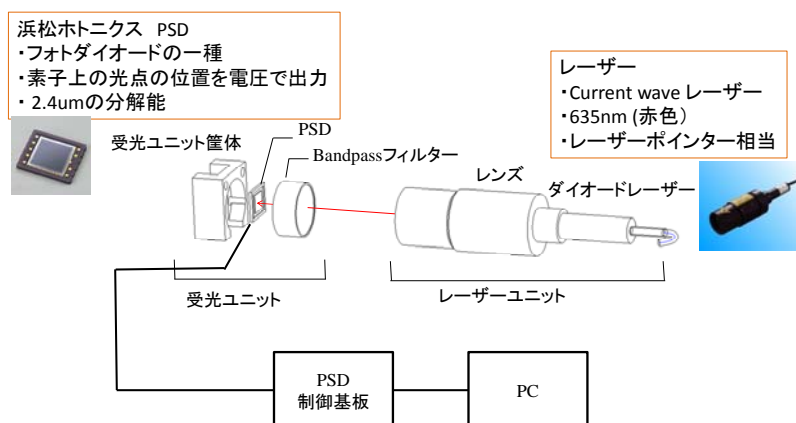


図3 高精度変位計測システム

本システムの計測精度を市販のレーザー変位計（Keyence LK-H155）と比較した。精度検証時のコンフィギュレーションを図4に示す。5mの基線長時のレーザー変位計の計測結果と本計測システムの結果の比較を図5に示す。ここで、LDがレーザー変位計、LDLが開発した高精度変位計測システムである。図5の結果より、5mの基線長においても、レーザー変位計との標準偏差は5 μ m以下であり非常に高い計測精度が実現できていることがわかる。今後はトラス光学架台の制御システムに実装すると同時に、本計測システムの耐宇宙環境性（熱真空、放射線）を実証する予定である。

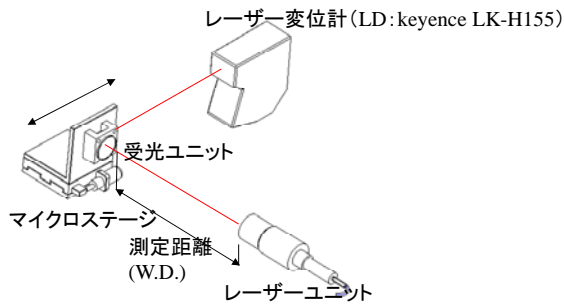


図4 測定精度検証コンフィギュレーション

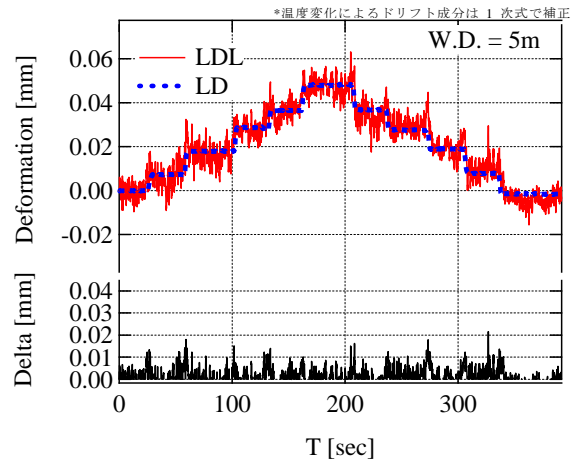


図5 精度検証結果 (LDL (開発品) vs LD)

3. 駆動機構システム

3.1 駆動機構システム概要

本研究では、熱変形の抑制が対象であるため、駆動機構システムの応答速度は、秒から分オーダーのゆっくりとした変動に対して十分であれば良い。また、軌道上での使用を想定すると摺動部のない信頼性の高いアクチュエータを有することが望まれる。そこで、著者らはヒーターによる人工的な部材の熱膨張をアクチュエータとして利用する駆動機構システムを採用した。ただし、ヒーターによる制御では、加熱の制御はできるものの、放熱は受動的なものに頼らざるを得ない。そのため制御入力に正負で非対称なものとなる制約が発生する。そこで、制御入力に対する制約を考慮し、かつ軌道上の熱変形の周期性に注目し、モデル予測制御を導入した。著者らの過去の研究において、適切な数学モデルが構築できれば、基線長 1.9m のトラス光学架台に対して式 (1) で定義されたポインティングを 1arcsec_RMS の精度で維持可能なことが確かめられた^[4]。しかしながら、この精度の実現には、加熱部材の温度分布の正確なモデル化のために多大な事前実験を要した^[7]。さらに、放熱速度を上げるために強制対流環境下での実験実施をしていたが、軌道上での使用には改善が必要である。そこで、加温部材の温度の一様性の向上と放熱性の向上を目的として、本研究では加温部材 (アクチュエータ) にヒートパイプを利用することを試みた。3.2 節でその概要を示す。

次に、本アクチュエータを組み込む駆動機構としては、図6に示すスチュワートのプラットフォームを採用する。通常、油圧/空圧のリニアアクチュエータが配置される斜部材を加温することで、熱膨張による長さ調整をし、下面に対する上面の位置および傾斜の制御を行う。光学架台の下端にこの機構を配置することで、ポインティングに必要な面内変位のみならず、6自由度の制御が可能となる。本研究で開発したスチュワートプラットフォームの特徴は、ヒンジ部を弾性ヒンジとしている点である。通常の球ジョイントの摺動部材を採用しないことで、真空環境下での高信頼性が期待される。3.3 節で設計・解析結果を示す。

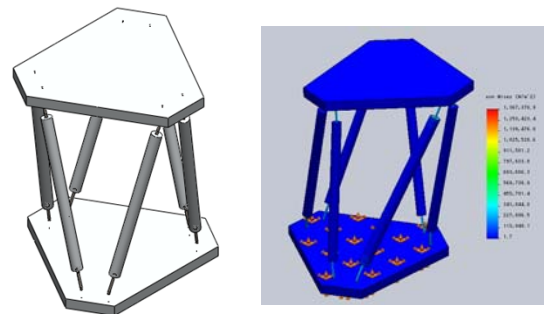


図6 スチュワートプラットフォーム

3.2 ヒートパイプアクチュエータ

ヒーターによって人工的な熱膨張をさせる加温部材（アクチュエータ）として、温度の均一性の向上と放熱性の向上のためにヒートパイプを利用する。ここで扱ったヒートパイプは、長さ 1007mm、直径 15mm のアルミニウム製の直管であり、図 7 に外観と断面を示す。



図 7 ヒートパイプ外観

ヒートパイプに対してリボンヒーターを巻き、加温時の温度分布を T 型熱電対により計測した。装置外観図と計測された温度分布をそれぞれ図 8, 図 9 に示す。計測結果から、加温部内の温度差 (No2,3) は、最大 1 度以内であり、熱輸送部内の温度差 (No4 ~6) は最大 2 度以内であることがわかる。温度上昇量に対する空間的な温度差は 4% 以下に収まっており、以前のアルミパイプを用いた時の結果である 10% (参考文献[7]) と比較し、温度均一性が向上していることがわかる。今後は、放熱面の付与と熱数学モデルの同定を実施予定である。

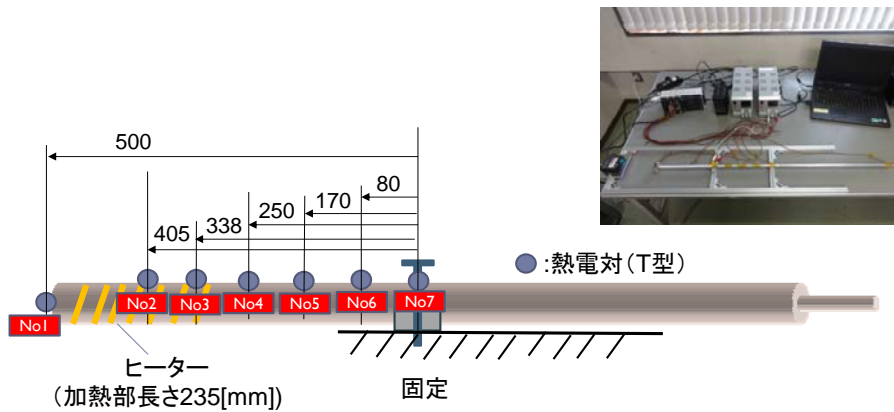


図 8 ヒーターによるヒートパイプの加温と温度分布計測コンフィギュレーション

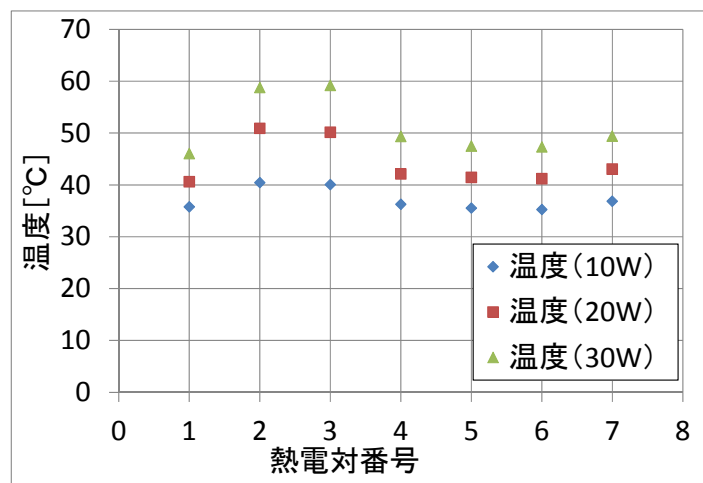


図 9 ヒートパイプ各部の温度分布

3.3 弾性ヒンジをもつスチュワートプラットフォーム

真空環境下での駆動を想定し、弾性ヒンジを有するスチュワートプラットフォーム（図 6）の開発を行なった。設計パラメータは、斜部材（加温部材）の部材長/剛性と弾性ヒンジの部材長/剛性、上下 IF 面の形状である。この設計パラメータを、可動域と発生応力を評価パラメータとして決定した（表 1）。

表 1 スチュワートプラットフォームの設計パラメータ

斜部材（加温部材）	長さ[mm]	223.5
	直径[mm]	15
	材料	A2014-T4
	ヤング率[GPa]	72.4
弾性ヒンジ	長さ[mm]	27.9
	直径[mm]	3.2
	材料	SS
	ヤング率[GPa]	210
IF 面での斜部材間距離	長辺距離[mm]	150
	短辺距離[mm]	16

この時の斜部材 1 本を加温した時の発生 Mises 応力を図 10 に示す。これより、各部材（加温部材 Al2014-T4、弾性ヒンジ SS）の 0.2% 耐力以内で、 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 程度の温度上昇は問題なく可能であることがわかる。次に図 11 に、各斜部材の温度上昇ベクトルの大きさを 1[K] 以下とし、上下面の並行を維持した場合の可操作楕円体を示す。図 11 では、面内変位 $12\mu\text{m}$ 、面外変位 $2\mu\text{m}$ であるため、 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ の昇温では、面内方向 $600\mu\text{m}$ 、面外方向 $100\mu\text{m}$ の変位の発生が可能である事がわかる。今後は実機による性能評価を行う予定である。

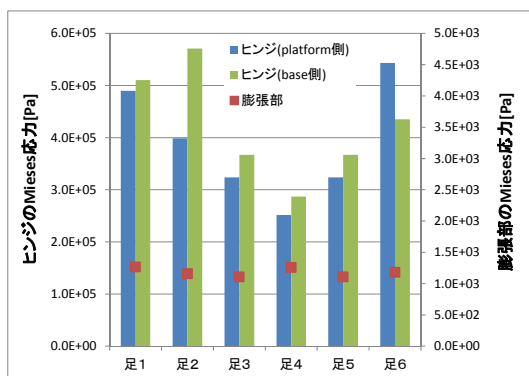


図 10 斜部材 1 本を加温した時の発生 Mises 応力

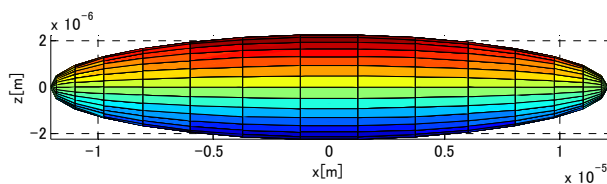


図 11 可操作楕円体 (ΔT)

4. まとめ

現在開発中の高精度光学架台のポインティング制御システムについて、特にその計測システムと駆動機構システムの開発状況を示した。計測システムとしては、5m の基線長において、 $5\mu\text{m}$ 以下の標準偏差を有する変位計測が実現できた。駆動機構システムとしては、ヒーターによる人工的な部材の熱膨張をアクチュエータとして利用した。部材の温度分布の一様性を改善するために、加温部材として、ヒ-

トパイプを利用し、. 温度上昇量に対する空間的な温度差は 4%以下に収まることを確認した。さらに、弾性ヒンジをもつスチュワートプラットフォームを設計し、弾性ヒンジに過負荷な応力をかけること無く、面内方向 $600\ \mu\text{m}$ 、面外方向 $100\ \mu\text{m}$ の変位の発生が可能であることを解析で確かめた。今後、このスチュワートのプラットフォームの加温部材にヒートパイプを組み込み、実機による性能評価を行う予定である。

参考文献

- [1] Keith Belvin, W., “Advances in Structures for Large Space Systems,” AIAA 2004-5898, Space 2004 Conference and Exhibit, San Diego, 2004.9.
- [2] Higuchi, K. et al.: Large deployable antenna structure for VSOP-2 mission, 59th IAC, IAC-08-C2.2.5, 2008.
- [3] Ishimura K, Senba A, Iwasa T, Ogi, Y., Akita, T., Furuya H., and Minesugi K., “Prediction, measurement and stabilization of structural deformation on orbit,” 61st international astronomical congress, Prague, pp. 6116–6121, 2010.
- [4] Funakoshi, Y., Ishimura, K., Ogi, Y., Iwasa, T., “Application of Preview Information to Pointing Control of Truss Structure Using Artificial Thermal Expansion on Orbit,” ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2013.
- [5] Takahashi, T., et al., “The NeXT Mission,” Proceedings of the SPIE meeting, Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray, Marseille, 2008.
- [6] 石村康生, “宇宙科学を支える構造・材料技術,” W191002, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013.
- [7] 船越裕亮, “,” 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 修士論文, 2013 年度.