

周期外乱を受けるトラス構造物の高精度なポインティング制御

船越 裕亮（東大・院），石村 康生（ISAS/JAXA），荻 芳郎（東大），岩佐 貴史（鳥取大）

Precise Pointing Control of Truss Structure Subjected to Periodic Disturbances
Yusuke FUNAKOSHI, Kosei ISHIMURA, Yoshiro OGI and Takashi IWASA

Key Words: Smart Structures, Pointing Control, Thermal Expansion, Preview Information, Model Predictive Control

Abstract

Pointing control of truss structure on orbit which is used for large space telescope is discussed. To maintain the pointing accuracy, we propose a smart structural system using artificial thermal expansion caused by heaters. To improve the control performance under some constraints, we applied “Model Predictive Control (MPC)” to the control system as feed-forward control with preview information. Through some experiments, the effectiveness of MPC was shown.

1. はじめに

現在JAXAにより開発が進められているASTRO-Hのような先進的な大型宇宙望遠鏡では、観測のために高い指向精度が要求される^{1,2)}。そのため、支持構造に対する主要求の一つとして、ポインティング性能を高精度に維持することが挙げられる。しかしながら、近年の宇宙構造物の大型化と高精度化も相まって、様々な外乱が加わる宇宙空間において所定の要求精度を満たすことは困難になりつつある。ゆえに、将来の超大型・高精度な宇宙構造物の実現のためには、自身の形状をセンシングし適切な制御を行うスマート構造システムの導入が必要であると考えられる。

そこで本研究では、宇宙空間において汎用的な支持構造であるトラス構造物に形状制御を取り入れ、ポインティング性能を高精度に維持することを目的とする。宇宙で用いるシステムには高い信頼性が要求される。そこで著者らは、機械部品を持たず、高い信頼性が期待できるヒーターをアクチュエータとして用い、能動的な熱膨張によるポインティング制御について研究を行ってきた。その結果、十分な制御性能と精度を達成し得ることを明らかにしてきた^{3,4,5)}。

その一方で、即応性や放熱などの課題も同時に明らかになり、これらの欠点を克服するような制御システムが必要とされていた。そこで、軌道上における外乱の周期性と熱入力の変動に着目し、新たな制御手法としてモデル予測制御(Model Predictive Control: MPC)⁶⁾を導入した^{7,8)}。MPCは、入力や制御出力などの線形不等式制約条件を組み込むことが容易で、測定可能な外乱を組み込んだ最適制御を行うこともできるという特長を有する。即ち、ヒーターのアクチュエータとしての制約と、周期外乱の予見情報を取り込んだ最適制御が可能となる。本論文では、現実のトラス構造物を用いてポインティング制御実験を行い、高精度な性能維持が可能であることを示す。

2. システムモデル

2-1 システム構成

制御システムの構成を図1に示した。ここでのアクチュエータはヒーターを、プラントとは構造システムを指す。構造システムに生じた熱変形を出力とし、変形量はセンサーにより観測される。

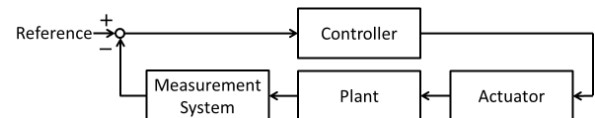


図1 システムブロック線図

適切な制御システムの設計のため、実験に用いる構造システムの熱数学モデル、構造数学モデルを構築した。熱数学モデルには後述の熱方程式を、構造数学モデルにはFEMを用いる。また、モデル化では観測値のノイズは考慮せず、出力値と観測値は等しいものとした。計算機上での解析には、MATLAB/Simulinkを用いた。

2-2 熱数学モデル

熱方程式を定式化する。外部からの熱入力としては、太陽輻射、地球赤外放射、アルベド、衛星内部機器からの発熱などが挙げられる。ここでは、これらを合わせて熱外乱 q_d とする。また、排熱を考えると、宇宙空間では赤外輻射のみが主であるが、今回の実験は大気中で行うため、自然対流の影響は無視できない。ゆえに、制御熱入力 q_u を加えた系の状態方程式は、以下のように書ける。

$$C \frac{dT}{dt} = e(q_u(t) + q_d(t)) - \sigma \varepsilon A_s (T^4 - T_a^4) - h A_s (T - T_a) \quad (1)$$

ここで、 T は温度、 C は熱容量、 σ はステファン・ボルツマン定数、 ε は物体の輻射率、 A_s は物体の表面積、 T_a は雰囲気温度、 e は入熱効率、 h は熱伝達率である。

2-3 モデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC)

MPCの概念を図2に示す。将来のある一定区間において、目標状態と予測された状態量との差分を計算し、最小化するように将来の一定区間までの制御入力を定める。ただし、制御入力値は求めたものの全てを用いるわけではなく、直近の1ステップのみを用いる。次の時刻では更新されたモデルを用い、再度同様の計算を行う。この制御方法の特長は、入力や制御出力などの線形不等式制約条件を組み込むことが容易で、また測定可能な外乱を取り込んだ最適制御を行うこともできるという点である。詳細な定式化については文献^{6,8)}を参照されたい。

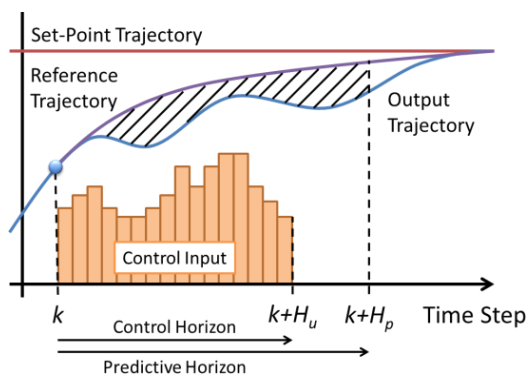


図2 モデル予測制御 (Model Predictive Control)

3. トラス構造物のポインティング制御

MPCの有用性を検証するため、図3に示すトラス構造物に対してポインティング制御実験を行った。実験機器の配線図を図4に、構造数学モデル、熱数学モデルの各物性値をそれぞれ表1,2に示した。このトラス構造物は65本の部材から成る、 x - z , y - z 平面に対称な不静定構造である。図3に示したように、構造上部の目標点と下部の基準点を結んだ直線を指向軸と見なし、これら2点の x - y 面内の相対変位を制御の対象とする。外乱が無い初期状態において、このトラス構造物は理想的なポインティング性能を有していると仮定し、制御における目標値を初期位置からの面内変位が0となるよう設定する。今回の実験では、根元の4本の部材にのみ熱を与える。ヒーター3,4を外乱源として、ステップ型、正弦波型の2通りの熱外乱を加える。ステップ型の外乱は日照・日陰における急激な熱外乱の変化を、正弦波型の外乱はアルベドなどによる緩やかな熱外乱の変化をそれぞれ模擬している。これらの外乱に対し、ヒーター1,2で適切な熱制御を行うことにより、変位を制御する。また、このトラス構造物は対称性を有するため、ヒーター1は $+x$ 方向、ヒーター2は $-y$ 方向にのみ変形を与えることができる。

3-1 ステップ型の熱外乱を付与した場合

まず、図4に示されるステップ型の熱外乱を与えた時の挙動について述べる。制御を行わなかったときの目標点の変位を図5に示した。熱外乱の切り替え時に変位が急激に変化しており、トラス構造物のポインティング性能が時間変化していることが確認できる。

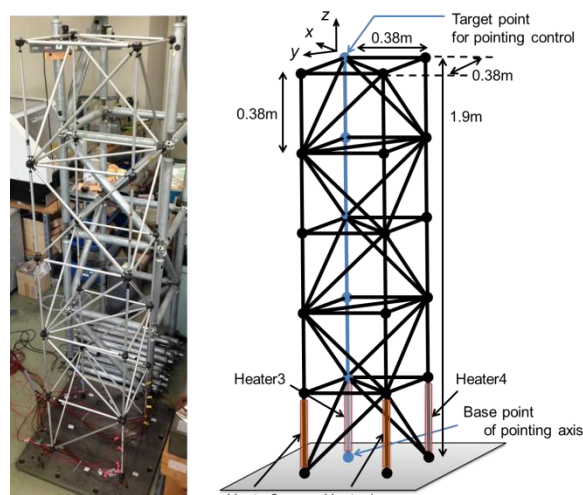


図3 制御対象のトラス構造物

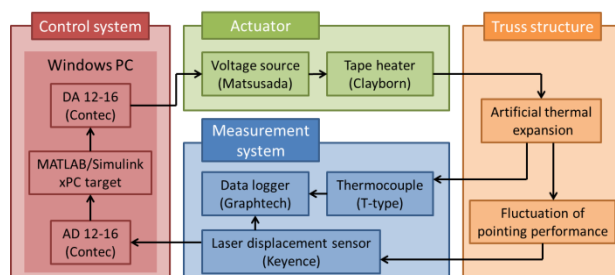


図4 実験機器の配線図

表1 構造数学モデルの物性値

	軸方向部材	斜め方向部材
材質	Al合金	
部材長さ [m]	0.38	0.54
部材表面積 [m ²]	0.012	0.017
質量 [g]	35.7	46.3
引張剛性 [N]	1.99×10^6	
線熱膨張係数 [K ⁻¹]	2.15×10^{-5}	

表2 熱数学モデルの物性値

熱方程式パラメータ	ヒーター抵抗値		
熱容量 C [J/K]	30	ヒーター1 [Ω]	81.16
熱伝達率 h [W/m ² K]	9.88	ヒーター2 [Ω]	78.85
入熱効率 e	0.75	ヒーター3 [Ω]	75.45
輻射率 ε	0.50	ヒーター4 [Ω]	78.00

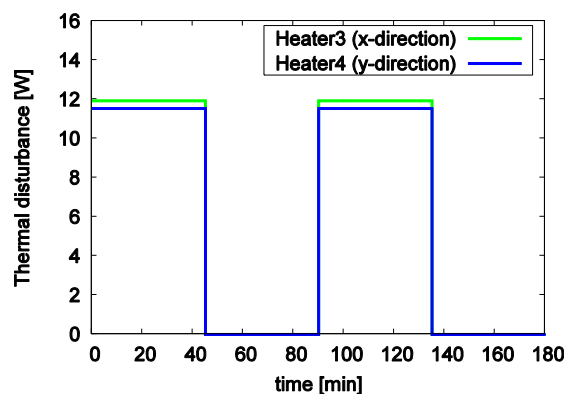


図4 ステップ型の熱外乱

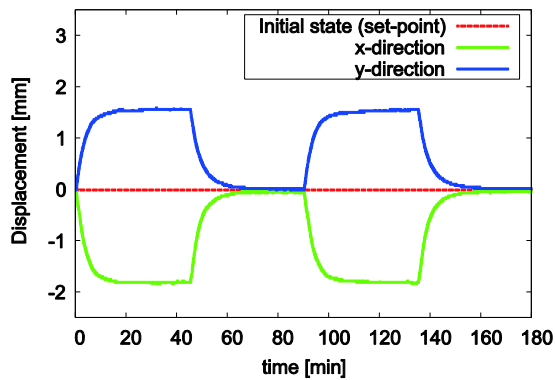


図5 ステップ型の熱外乱により誘起された変位

図6はステップ型の熱外乱に対し、PI制御のみを用いて制御を行った結果である。定常的には誤差10 μ m程度という高精度な追従が実現できているものの、熱外乱が変化する度に目標値からのずれが生じていることが分かる。PI制御は、変位が生じた後から制御を開始するため、このような一時的なポインティング性能の悪化にまで対処することは困難である。

一方、PI制御に加え、MPCを用いて制御を行った結果を図7に示した。図7を見ると、熱外乱が変化する時刻の周辺においても、ポインティング性能は悪化せず、常に一定の精度で目標値に追従していることが分かる。これは、MPCが急激な熱外乱の変化を予測し、フィードフォワード的に制御を行っているためである。その結果、全時刻にわたって高精度な制御が実現できている。

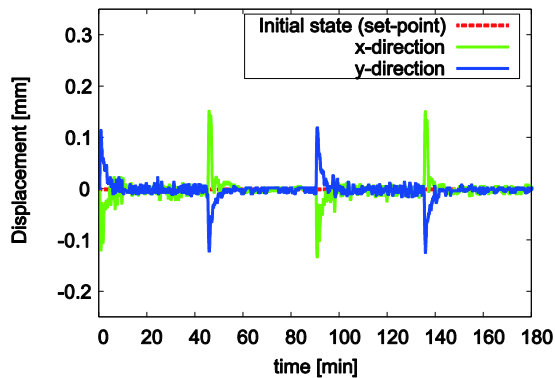


図6 ステップ型の熱外乱に対してPI制御を用いた場合の変位

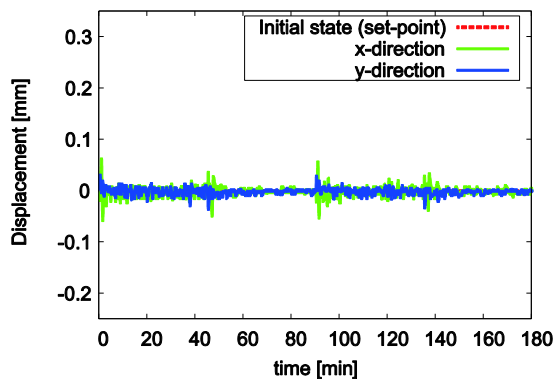


図7 ステップ型の熱外乱に対してMPCを用いた場合の変位

3-2 正弦波型の熱外乱を付与した場合

図8に示される正弦波型の熱外乱を与えた時の挙動について述べる。制御を行わなかったときの目標点の変位を図9に示した。この場合、誘起される変位は滑らかな正弦波型の応答として得られていることが分かる。

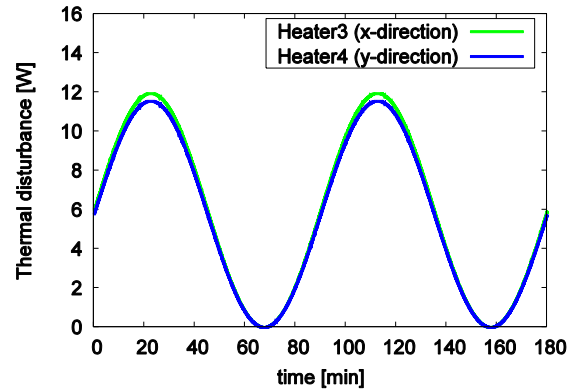


図8 正弦波型の熱外乱

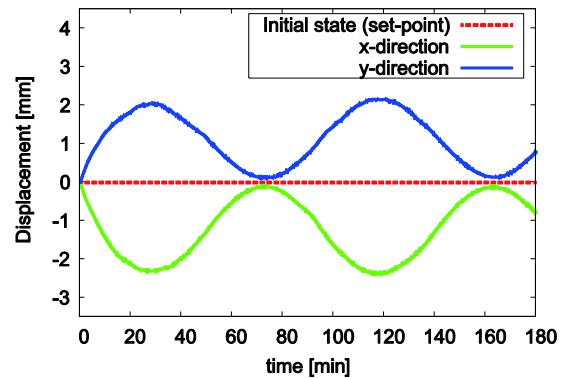


図9 正弦波型の熱外乱により誘起された変位

図10は正弦波型の熱外乱に対し、PI制御のみを用いて制御を行った結果である。ステップ型の時のような目標値からの大きなずれは無く、誤差10 μ m程度で定常的に高精度な追従が実現できている。残差が正弦波の形状でわずかに残っていることも確認できるが、定常誤差に比べてその振幅は無視できるほど小さい。正弦波型では、熱外乱の時間変化が緩やかであるため、PI制御でも高い制御性能が達成できていると考えられる。

一方、PI制御に加え、MPCを用いて制御を行った結果を図11に示した。図11を見ると、定常誤差はPI制御のみの時と同程度で定常的に目標値に追従できていることが分かる。ステップ型の時のような、顕著な性能変化はグラフからは見られないものの、MPCを用いたことで制御開始時の応答が改善していることが確認できる。

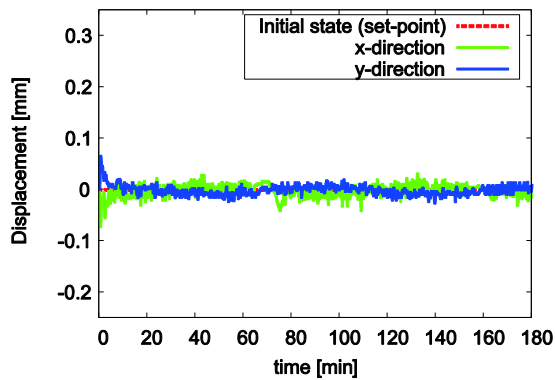


図10 正弦波型の熱外乱に対してPI制御を用いた場合の変位

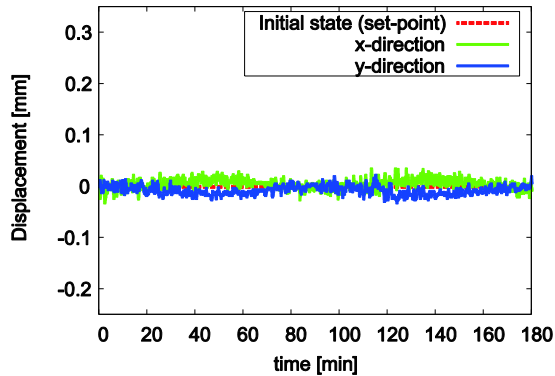


図11 正弦波型の熱外乱に対しMPCを用いた場合の変位

3-3 制御性能の比較

これら2通りの熱外乱を用いた実験結果について、目標点の変位のRMS値を比較することで制御性能を評価する。変位のRMS値を以下のように定義する。

$$\delta_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{\tau}^{\tau+T} (\delta_x^2 + \delta_y^2) dt} \quad (2)$$

ここで、 δ_x, δ_y はそれぞれx,y方向の変位、 T_c は外乱の周期である。各熱外乱、制御方法について、実験結果から算出したRMS値を表3に示した。RMS値は目標値からのばらつきを表す統計量であるから、値が小さいほど高い精度で制御されていることを示す。また、参考のために熱外乱、制御なしの状態、計測系の背景雑音についても測定を行った。その結果、背景雑音のRMS値は $2\mu\text{m}$ であった。

表3 実験結果に対するRMS値

熱外乱	制御方法		
	制御なし	PI制御	MPC
ステップ型	1621 μm	29 μm	11 μm
正弦波型	1947 μm	15 μm	16 μm

表3から、ステップ型、正弦波型ともに、制御を行うことでポインティング性能が高精度に維持されていることが確認できる。ステップ型の熱外乱に対して制御性能を比較すると、MPCを用いることにより、PI制御に比べ61%程度のRMS値の改善が確認できた。その一方で、正弦波型の熱外乱に対しては制御方法によるRMS値の改善は見られず、背景雑音による誤差の範囲内での変化であった。これは、正弦波型の熱外乱は時間変化が緩やかであり、PI制御のみで

も十分な性能を得ることができたためと考えられる。

4. 結言

軌道上のトラス構造物に対する、能動的な熱膨張を用いた高精度なポインティング制御システムについて研究を行った。軌道上における外乱の周期性と制御入力の変位に着目することで、制御手法としてモデル予測制御を導入した。その有用性の検証のため、熱外乱を受けるトラス構造物に対し、ポインティング制御実験を実施した。熱外乱としてはステップ型と正弦波型という2種類を用意し、制御性能の比較のためにPI制御とMPCによって制御を行った。実験の結果、MPCを用いることでPI制御に比べて制御性能が向上したものの、その改善比は外乱の形状によって大きく異なることが明らかになった。

一方で、今回の実験においては制御入力の上限に対する制約として、熱外乱と同程度の加熱量まで許容しており、十分なリソース下での制御であったということを述べておく。実際の宇宙機では、用いることができる電力量は多くの場合制限されるため、リソースが乏しい条件下でどのような制御性能が発揮できるかについても、今後検討を進めたい。MPCの改善効果について更なる考察を進めた後、より実運用に近い環境での実験などを実施していきたい。

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の戦略的研究開発費の支援の下、実施された。

参考文献

- 1) L. Puig, A. Barton, N. Rando, “A review on large deployable structures for astrophysics missions,” *Acta Astronautica*, **67**, pp.12-26, 2010.
- 2) T. Takahashi, et al., “The ASTRO-H Mission,” *SPIE*, **7732**, pp.77320Z-77320Z-18, 2010.
- 3) K. Ishimura, A. Senba, T. Iwasa, Y. Ogi, T. Akita, and K. Minesugi, “PREDICTION, MEASUREMENT AND STABILIZATION OF STRUCTURAL DEFORMATION ON ORBIT,” 61th IAC, 2010.
- 4) 石村康生, 秋田剛, 仙場淳彦, 荻芳郎, 岩佐貴史, 古谷寛, 峯杉賢治, “熱膨張によるトラスのポインティング制御,” 第19回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2011.
- 5) 船越裕亮, 石村康生, “熱膨張によるトラスのポインティング制御におけるロバスト性評価,” 第28回宇宙構造・材料シンポジウム, 2012.
- 6) Jan M Maciejowski, “モデル予測制御 制約のもとでの最適制御,” 東京電機大学出版, 2005.
- 7) 船越裕亮, 石村康生, 荻芳郎, 岩佐貴史, “予見情報に基づく熱膨張を用いたトラス構造物のポインティング制御,” 第55回構造強度に関する講演会, 2013.
- 8) Y. Funakoshi, K. Ishimura, Y. Ogi and T. Iwasa, “Application of Preview Information to Pointing Control of Truss Structure Using Artificial Thermal Expansion on Orbit,” *Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2013.