

称号及び氏名 博士（工学） 権 陽弥

学位授与の日付 令和 3 年 3 月 31 日

論文名 「不確定性を考慮した高精度伸展式光学架台の  
指向性能解析に関する研究」

論文審査委員 主査 小木曾 望  
副査 下村 卓  
副査 辻井 利昭

## 論文要旨

本研究は、人工衛星に搭載されるアンテナの支持構造である伸展式光学架台において、構造に含まれる不確定性が指向性能におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。次世代の伸展式光学架台への要求精度は秒角のオーダーへとますます厳しくなる。そのため、構造が持つ微小な不確定性の影響をこれまで以上に高精度に推定することが必要になっている。本研究では、不確定性として、部材長さの初期不整、伸展構造物に必然的に存在するガタと摩擦を考える。まず、X線天文観測衛星 ASTRO-H で実装された伸展式光学架台を元にトラス構造モデルを作成する。そして、これらの不確定性が指向性能におよぼす影響を明らかにするために、有限要素法により平衡解析を行う。そして、理想的な伸展方向に対する誤差として定義される指向角を用いて指向性能を評価する。

はじめに、部材長さの不確定性が指向性能に与える影響を評価する。部材長さの不確定性が独立した正規分布に従うと仮定し、モンテカルロ法を用いて指向角の信頼区間が部材長さの不確定性の大きさと線形関係にあることを示す。そして、その関係性を用いて、目標とする指向精度を達成するための部材長さの不確定性許容値を推定する。次に、部材接合部のガタの不確定性を考慮する。ガタをモデル化するために仮想ケーブル部材を提案し、部材長さ とガタの両方の不確定性が指向性能におよぼす影響を評価する。さらに、部材接合部の摩擦の不確定性も評価する。そのために、平衡状態にある構造の節点に生じる摩擦力を偶力としてモデル化することで、接触解析を行うことなく低い計算コストで摩擦の影響を考慮できる解析手法を提案する。最後に、これまでのモンテカルロ法による指向性能評価について、計

算コストの面における問題点を示し、サポートベクターマシン (SVM) を導入することでその解決法を提案する。

本研究では、いくつかの数値計算例を通して、不確定性が指向性能におよぼす影響について以下の結論を得た。はじめに、部材長さの不確定性のみを考慮した場合、指向角の信頼区間が部材長さの不確定性の大きさと線形関係にあり、それを用いて指向精度の目標値を達成するための不確定性許容値の推定が可能であることを示した。また、指向角の分布は確率分布の一種であるレイリー分布に従うことを明らかにした。次に、部材接合部のガタの不確定性を考慮した場合、ガタの存在によって部材長さの不確定性の影響が小さくなり、ガタを考慮しない場合と比べて指向角の変動が小さくなる傾向にあることを示した。さらに、部材接合部の摩擦の不確定性が、伸展式光学架台の指向性能の展開再現性に無視できない影響を与えることも明らかにした。そして、摩擦の不確定性が指向性能に与える影響と、部材長さやガタが指向性能に与える影響ではその傾向に差異があることを示した。

本論文は、7章によって構成される。以下に、各章の構成と概要を示す。

第1章では、研究の背景と論文構成について述べる。

第2章では本研究で用いる構造解析モデルとその解析手法について述べる。まず、X線天文観測衛星ASTRO-Hで実装された伸展式光学架台の構造の詳細を説明する。そして、それを基にした本研究で用いる構造解析モデルについて述べる。本研究では伸展式光学架台が完全に展開した状態を考える。そこに不確定性を付与して平衡解析を行い、理想的なトラス伸展方向に対する誤差として定義される指向角を用いて指向性能を評価する。さらに、構造解析モデルの部材長さに初期不整がある場合、平衡解析には非線形有限要素法が必要となる。そこで、ニュートン法を用いた非線形有限要素法の解法について説明する。

第3章では部材長さの不確定性が指向性能におよぼす影響について評価する。はじめに、非線形有限要素法を用いた平衡解析と、指向角の変動量を評価するための信頼区間について説明する。部材長さの不確定性が正規分布に従うと仮定し、不確定性の大きさをパラメトリックに変化させてモンテカルロ法により繰り返し平衡解析を行う。それにより、指向角の下側95%信頼区間が不確定性の大きさと線形関係にあることを示し、その関係を用いて要求精度を達成できる不確定性許容値を推定する。さらに、指向角分布が確率分布の一種であるレイリー分布に従うことを解析的に導き、より効率的な許容値の推定方法を示す。また、構造解析モデルのトラス段数や、不確定性が従う確率分布の変化による指向角への影響を評価し、解析モデルの妥当性についても検証を行う。第4章では部材接合部のガタの不確定性を導入する。部材長さやガタの不確定性が指向性能におよぼす影響について評価する。ガタを接合部の軸受径と部材幅の差として定義し、その差の半分を自然長にもつ仮想ケーブル部材を導入することで、ガタをモデル化する。いくつかの簡単な構造モデルにこのガタモデルを適用し、平衡解析を通してその妥当性を示す。そして、部材長さやガタの不確定性が指向性能におよぼす影響について評価する。指向角の下側95%信頼区間と不確定性の大きさの関係を示し、要求精度を達成できる不確定性許容値を推定する。それにより、ガタがあることで許容値が緩和されることを明らかにする。

第5章では部材接合部の摩擦の不確定性を導入する。摩擦の影響により展開を阻害する方向のモーメントが節点に働くことを考え、それを偶力に置き換えて各節点に付加することで摩擦力が指向性能におよぼす影響を低い計算コストで求める手法を提案する。いくつかの簡単な構造モデルにこの摩擦モデルを適用し、平衡解析を通してその妥当性を示す。そして、部材長さやガタに不確定性がなく、摩擦に不確定性がある場合の指向角の変動の傾向について検証し、指向角に与える影響が、部材長さやガタの不確定性と、摩擦の不確定性とで差異があることを示す。さらに、3種類全ての不確定性を考慮した場合の指向角の変動を評価し、摩擦の不確定性の影響が、部材長さやガタの不確定性の影響に対してどの程度のスケールであるのかを確認し、その傾向を確認する。また、摩擦の不確定性の影響により、指向角分布がレイリー分布から外れる傾向にあることを示す。

第 6 章では第 5 章までの指向性能解析にかかる計算コストを，SVM を導入することで低減する方法を提案する．部材長さやガタを確率変数とした標本においては，全てのガタを片当たりさせることができず，節点位置が確定しないことがある．そのような標本は非現実的な構造のため，平衡解析を行うこと自体が無駄である．そこで，2 クラス分類を行う機械学習の一種である SVM を導入し，節点位置が確定しない標本を平衡解析を行う前に取り除く．さらに，伸展式光学架台の構造に周期性があることを利用して，トラス構造の一部を取り出して学習を行い，その学習結果を大規模構造に適用することで，より効率的に節点位置が確定しない標本を取り除く手法を提案する．そして，数値計算例を通して，SVM を導入した提案手法により，大規模構造の指向性能解析にかかる計算時間を約半分に削減できることを示す．

第 7 章では結論と今後の課題を述べる．

本論文の基礎となる発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名	本論文との対応
1	Effect of Member Length Uncertainty and Backlash on Deformation Accuracy for a High-Precision Space Truss Structure	Y. Gon N. Kogiso	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 64, No. 1, pp. 31-39 (2021)	第 2 章 第 3 章 第 4 章
2	部材長さ及び結合部のガタと摩擦の不確定性を考慮した伸展式光学架台の展開再現性解析	権 陽弥 小木曾 望	構造物の安全性および信頼性 Vol. 9 JCOSSAR2019 論文集, pp. 483-489 (CD-ROM) (東京, 日本, 2019) (全文査読付)	第 2 章 第 5 章
3	Deployment Repeatability of Pointing Performance for Highly Precise Extensible Optical Bench Considering Uncertainties on Backlash and Friction	Y. Gon N. Kogiso	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 18, No. 3, pp. 25-31 (2020)	第 2 章 第 5 章
4	高精度宇宙トラス構造のガタの不確定性を考慮した指向精度解析のサポートベクターマシンによる効率化	権 陽弥 小木曾 望	日本航空宇宙学会論文集 (投稿中)	第 2 章 第 4 章 第 6 章

## 審査結果の要旨

本論文は、人工衛星に搭載されるアンテナの支持構造である伸展式光学架台において、構造に含まれる種々の不確定性（部材長さ、ガタ、摩擦）が指向性能におよぼす影響を数値解析により明らかにした研究であり、以下の成果を得た。

- (1) 部材長さの不確定性が独立した正規分布に従う場合、光学架台の指向角の信頼区間が部材長さの不確定性の線形関数で表せることを示した。この関係を利用して、目標とする指向精度を達成するための部材長さの不確定性許容値を推定した。さらに、このとき、指向角の分布がレイリー分布に従うことを明らかにした。
- (2) 部材接合部のガタをモデル化するために仮想ケーブル部材を提案し、部材長さ とガタの両方の不確定性が指向性能におよぼす影響を効率的に評価できることを示した。さらに、ガタの不確定性を考慮することで、光学架台の目標指向精度を達成する部材長さの不確定性許容値が緩和されることを示した。
- (3) 部材接合部に生じる摩擦の不確定性を効率的に評価する手法を提案した。具体的には、部材接合部に生じる摩擦力を仮想ケーブル部材の両端に働く偶力としてモデル化して平衡解析を行うことで、接触解析を行うことなく低い計算コストで摩擦の影響を考慮できることを示した。この手法を用いて、部材長さの不確定性、接合部のガタの不確定性と摩擦の不確定性という三大不確定要因が、光学架台の指向角精度におよぼす影響を定量的に評価できることを示した。
- (4) 上記の平衡解析法では、部材接合部のガタの不確定性の組み合わせによっては、平衡状態を求めることができない場合がある。この数値不安定性を解決するために、サポートベクターマシンを導入することで不安定な条件を取り除くことができ、計算コストの削減につながることを示した。

以上の諸成果は、これまで定性的な評価にとどまっていた高精度宇宙構造システムの要素における種々の不確定性がシステム応答におよぼす影響を定量的に評価できることを示したものであり、高精度が要求されるシステムに対する不確定性を考慮する設計に大いに貢献するものである。また、これらの知見は不確定性に対する設計要求が厳しい航空宇宙システムの学術的な発展に貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。