

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名      コンタクソグル   アナスタシオス

工学修士コンタクソグル   アナスタシオスの論文は「A Multifidelity Simulation Framework for Digital Twin Modelling of Spacecraft (宇宙機のデジタルツインモデル化のための複数忠実度のシミュレーションフレームワーク)」と題し、6章と附録からなっている。

人工衛星をはじめとする宇宙機の高精度シミュレータは宇宙機の開発時において設計パラメータの探索を通して最適設計を得たり、宇宙環境試験の代用としたりする目的で、また運用時には計画した動作シーケンスを宇宙機が安全に遂行できるかを事前に検証する目的で利用できる非常に有用なツールとして注目されており、広くはデジタルツインという枠組みでの研究が行われている。しかし十分な精度を得るには、熱や構造を含む宇宙機システムの高忠実度のモデルが必要であること、および、複雑で詳細なモデルをもとにシミュレーションする際の莫大な計算負荷が大きな課題であり、精度と計算時間の双方において優れたシミュレーション手法の構築が待たれるところであった。

そこで本論文では、過去の衛星の地上試験や軌道上の挙動から導出した低精度だが高速計算できる低忠実度モデルによるシミュレーションに、高忠実度のモデルによるシミュレータや実際の計測値から導出される高精度の数値を **Cokriging** という手法でフュージョンすることにより、精度と計算量の両観点から要求を満たす宇宙機のシミュレータを構成する方法論を提案し、シミュレーションで検証することを目的としている。**Cokriging** 法のメリットとして、少ない計算コストで精度の高い解が得られること、ガウス過程回帰をベースとしているため解の不確定性を評価可能であること、複数の物理分野(マルチモーダル)の連成が容易であることの3つが挙げられる。

実証対象として 6U サイズおよび 50 kg クラスの 2 機の衛星の温度予測を題材に、リカレントニューラルネットワーク一種である GRU(Gated Recurrent Unit)を低忠実度のモデル、実際の温度計測結果を高忠実度のモデルとして **Cokriging** でフュージョンする複数忠実度のシミュレータの構築方法を提案し、オンボードで処理可能な計算負荷の範囲内で、熱解析に要求される高精度の予測を実現していること、熱だけでなく電力予測まで含めたマルチモーダルのシミュレーションに拡張可能であること、ロバストネスの観点でも従来手法に比

べ安定してよい性能を発揮することを示している。

第 1 章では、序論として、宇宙機開発や運用における宇宙機やサブシステムのシミュレータの必要性を述べ、精度や計算量など、シミュレータに要求される特性を取り上げ、本論文の動機付けを行っている。

第 2 章では、高精度な宇宙機の状態量の予測を行う方法論として複数忠実度のシミュレーションの概念とその際のデータフュージョンに利用する **Cokriging** 法を説明している。さらに、同じような状態量の予測を行う手法としてこれまで利用されてきた自己回帰法、ガウシアンプロセス、ニューラルネットワーク等を取り上げ、それらの現状技術をサーベイしている。

第 3 章では、まず本論文の研究のベースとなるフレームワークであるデジタルツインの概念を取り上げ、航空宇宙分野を中心に研究現況を幅広くサーベイしている。さらに、それを実現する方法として利用される物理モデルベースおよびデータ駆動型シミュレータの特徴とそのハイブリッド化手法を説明している。

第 4 章では、本論文で提案する複数忠実度シミュレータの詳細を説明し、**Cokriging** 手法を利用したデータフュージョンによりなぜ精度が向上するかを物理的に議論している。人工衛星の熱予測問題を取り上げ、定期的に得られる実温度データを **Cokriging** 法を利用して入力することで、低忠実度のデータ駆動型シミュレーションの精度を向上させ、少ない計算量でも十分な精度を得られる可能性を示している。また、次章の比較検討で使われる従来手法と評価に使う指標を説明している。

第 5 章では、二つの超小型衛星の熱解析を題材に、ときおり得られる実際の衛星の温度情報を「高精度モデル」とみなし、低忠実度データ駆動型のシミュレータである GRU の予測結果にフュージョンすることで、GRU を単独で利用したケースやガウシアンプロセスなどの従来手法に比べ、平均誤差、平均絶対値誤差など複数の指標で優れた熱予測ができること、**Sliding Window** 法の導入により精度をそれほど悪化させなくても計算量の大幅な削減が可能であること、電力予測も入れたマルチモーダルなシミュレーションへの拡張ができることを示し、提案手法の有効性を実証している。

第 6 章は、本論文で提案した手法を総括し、結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文では、高精度でオンボードでの計算に耐える宇宙機シミュレータの実現という課題に対し、複数の忠実度のモデルを **Cokriging** 法でフュージョンするという手法を提案し、人工衛星の熱設計を題材に従来手法と比較検討し、その優位性や特性を示したものであり、宇宙工学・システム工学上貢献するところが多い。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。