

## 審査の結果の要旨

氏名 中島 晋太郎

修士（工学）中島晋太郎提出の論文は、「モデルベースシステムズエンジニアリングを活用した宇宙機搭載自律プランナーの構築手法に関する研究 Development of Onboard Planner for Autonomous Spacecraft Using Model-Based Systems Engineering」と題し、本文5章および附録からなっている。

近年、軌道上に打ちあがる宇宙機の数が増加してきており、宇宙機に自律機能を搭載する必要性が高まっている。宇宙機の自律機能には、宇宙機の振る舞いのパターンをルールとして事前に定める『If-then ルール』ベースの自律機能と、宇宙機と外部環境のモデルを持ち、そのモデルをもとに自動計画アルゴリズムを用いてどのような行動をすべきかを自ら探索する『モデルベース』の自律機能がある。未知の状況にも柔軟な対応ができるというカバレッジの観点で、モデルベースの自動計画アルゴリズム（オンボードプランナー）を宇宙機に搭載することが望ましいが、探索に利用するモデルの構築作業が属人的で検証が難しいという問題があり、オンボードプランナーが実ミッションに使用された例は世界的に見ても極めて少ない。探索に利用するモデルに記述されるのは宇宙機の振る舞いに関する情報であり、その内容は宇宙機的设计・製造時に定まるはずである。そこで本論文は、宇宙機的设计情報を正確に記述し、その情報をもとにオンボードプランナーに用いるモデル（ドメインモデル）を構築することによって、モデル構築の属人性や検証の問題を解決することを目指している。具体的には、ドメインモデルの裏付けとなる宇宙機的设计情報を正しく構築するために、モデルベースシステムズエンジニアリング（MBSE）の適用を提案している。MBSEにより、宇宙機を構成する各機器の振る舞いが検証された状態でモデル化・図示され、図示された设计情報からオンボードプランナーの利用するドメインモデルが構築できる。そして、実際の宇宙機に本手法を適用し、设计情報からシームレスにオンボードプランナーが実装できることを実証している。

第1章では、将来の宇宙機運用の課題をまとめ、その解決手法として宇宙機上での運用の自動化・自律化を提案している。宇宙機の自律機能は『If-then ルールベース』と『モデルベース』に大別できるが、カバレッジの観点から後者を宇宙機の自律機能として用いることが望ましい。しかし、この場合、自律プランナーで利用するモデルの構築作業が属人的で検証が難しいことが、自律プランナーの実現にあたっての本質的な課題であると述べている。

第2章では、自律プランナーの構成要素を整理している。本論文では、ミッション運用と異常検知・対処運用を自動化・自律化の対象と定め、自律プランナーが『Planning Engine』『Low Level Controller』『Operator』『Executor』『State Monitor』の5つから構成される

べきであることと、そのために必要な情報がドメインモデルとテレメトリ・コマンド情報に集約できることを示している。ドメインモデルについては、宇宙機の自律機能に必要な自動計画問題の複雑度を整理することで、PDDL 2.1 以上に相当する記述能力が必要であることを示している。また、テレメトリ・コマンド情報については、搭載ソフトウェア・アーキテクチャの一つである **Command Centric Architecture (C2A)** を **Low Level Controller** に用いることによって、テレメトリ・コマンドのデータベースの記述方法を示すだけでなく、テレメトリ・コマンドとドメインモデルの関係性のシステムティックな記述方法を提案している。

第3章では、宇宙機の設計情報の構築・記述方式に関して議論している。設計情報をモデル化しながらシステムを開発し、検証する手法の一つがモデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE) である。MBSE のプロセスを宇宙機開発に適用し、その中で自然と描かれる状態遷移図やシーケンス図に情報を付加することにより、自律プランナーのためのドメインモデルに必要な情報を宇宙機開発プロセスの中で自動的に構築できることを示している。さらに、MBSE を適用した宇宙機の開発プロセスの中でテレメトリ・コマンドの設計も行われ、第2章で示した方法によってテレメトリ・コマンドの情報とドメインモデルの関係性を記述することにより、自律プランナーの構築に必要な情報とモデルを設計情報から導き出せることを示している。

第4章では、**EQUULEUS** という実際の宇宙機に提案手法を適用している。**MagicGrid** という MBSE のガイドラインに則って宇宙機の設計モデルを構築、検証し、搭載機器の状態遷移図に情報を付加することでドメインモデルの構築を行っている。さらに、ドメインモデルの情報と C2A のテレメトリ・コマンドデータベースを組み合わせることで、自律プランナーの構築に必要な情報とモデルを全て設計情報から構築している。この情報とモデルをもとに、自律プランナーを **EQUULEUS** 搭載計算機と外部拡張ボードである **Raspberry Pi** を組み合わせて実装し、与えられた運用目標を達成できる運用計画を立案し実行できることと、異常への対処を自律的に行えることの二点を確認している。

第5章では、本論文の結論、提案手法の発展性と、今後の課題をまとめている。

以上要するに、本論文は、宇宙機の設計からオンボードプランナーの構築までをシームレスに検証された形で行う手法を提案し、宇宙機の実機を用いて提案手法の実用性も示すことにより、オンボードプランナーの実利用に向けた重要な成果をあげたものであり、宇宙工学上貢献するところが大きい。

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。