

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 中島 晋太郎

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。本研究における自律機能は、「宇宙機の運用を宇宙機上で自動化する機能」としている。自律機能として、宇宙機の振る舞いの全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」の自律機能である「宇宙機搭載自律プランナー」を構築することを目指す。探索に利用するモデルの構築は属人的になっているとともに、検証が難しいという問題がある。宇宙機搭載自律プランナーに利用するモデルには、宇宙機の振る舞いに関する内容が記述されるが、その内容は衛星の設計時に定まるはずである。そこで、宇宙機的设计情報を正確に記述し、その情報をもとにプランナーに用いるモデルを構築することで、モデル構築の属人性や検証の必要性を低減することを目指している。

本研究では、人間によって行われる運用の一部を宇宙機側で自動化するというモチベーションのもとに宇宙機搭載自律プランナーの目的を定めた。宇宙機の運用内容を「打ち上げ後の初期の搭載機器動作確認」「宇宙機の軌道解析・決定」「異常検知・対処」「ミッション運用」の四項目に大別し、このうち後半の二項目を自動化することを本研究で構築する自律プランナーの目的とした。具体的には、「運用目標が与えられたときに、自動計画アルゴリズムを用いて、運用目標を達成できる方策を自ら探索し、実行できること」と「ミッション運用を行う際に、異常が発生した場合であっても、それに対処をしたうえで運用目的の達成を目指すこと」の二つと定義した。続いて、この目的を

達成するための宇宙機搭載自律プランナーの構成要素を、「Planning Engine」「Low Level Controller」「Operator」「State Monitoring」「Executor」の五つに整理した。これらの構成要素を実装するのに必要な情報について議論を進めていくと、「ドメインモデルの記述内容」と「Low Level Controller に関する情報」、「ドメインモデルとLow Level Controller に関する情報の関係性」に集約されることを導いた。後者の自由度は非常に限られているため、前者に関して深く議論を進めることで、宇宙機の自動計画問題を記述するためにはPDDL 2.1 以降のプランニング記述言語を用いればよいことを示した。PDDL 2.1 以降で宇宙機の自動計画問題を記述することにより、自動計画問題を解くためのアルゴリズムは既存のものを利用でき、アルゴリズムの検証が不要となる。さらに、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マティックな記述方法を提案している。

続いて、宇宙機の運用と自動計画アルゴリズムの相似性から、宇宙機の振る舞いを記述するドメインモデルの内容は宇宙機的设计情報、特にコマンド・テレメトリの情報と深い関連性があることを整理した。この関連性から、宇宙機のドメインモデルを正確に記述するためには、コマンド・テレメトリを含めた設計情報が正確であることが重要であると考え、コマンド・テレメトリの設計情報を正確に構成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) のプロセスを利用することとした。MBSEのプロセスによりシステムレベルの抽象的な要求をもとにトレーサビリティを取りつつ搭載コンポーネントの設計を行うことができ、搭載コンポーネントの設計からコマンド・テレメトリの設計情報が定まる。また、抽象的なモデルの段階で設計の妥当性確認を行うことができるだけでなく、製造した結果からもモデルの修正を行うことによって、検証された設計モデルの構築が可能である。MBSEのプロセスを進める中で自然と描かれるコンポーネントの状態遷移図やシーケンス図によって、コマンドやテレメトリの設計に関する情報が抽出できることが示唆された。この結果をもとに、本研究では、MBSEのプロセスによって自然と記述される状態遷移図やシーケンス図といったダイアグラムをもとに、宇宙機のドメインモデルであるPDDLファイルを自動生成することによって、宇宙機の検証された設計情報をもとに自律プランナーの中心をなすドメインモデルを構成するという一連のプロセスを提案している。

本研究では、提案したプロセスを東京大学とJAXAが中心となって開発を進めている、EQUULEUSという宇宙機に適用し、実際の宇宙機搭載計算機で実験を行った。MBSEを進めていく上でのMethodologyの例としてMagicGridを採用し、ダイアグラムの生成を行った。コンポーネントの状態遷移図に、状態遷移の詳細な条件という付加情報を加えることで、状態遷移図からコンポーネントのドメインモデルを構成できることを確認した。続いて、各コンポーネントのドメインモデルを統合して宇宙機のドメインモデルを構成し、自動

計画実験を行ったところ、抽象的なミッション目的を達成する方策を自動で探索できるだけでなく、簡易な故障に対しても対処を行えることを確認できた。最後に、実際の宇宙機に搭載する計算機を利用して自律プランナー全体の検証を行い、設計モデルをもとに構成した自律プランナーによって、「異常検知・対処」「ミッション運用」の自動化が行えることを確認した。

以上の成果は、これまで検証プロセスが明確でなく、信頼性が低かった自動計画アルゴリズムベースの自律機能をより簡易に、かつ信頼性を保って構築することを可能にしており、より高度な自律機能を持った宇宙システムを実現させる礎となるものである。