

Title	SysMLメタモデルを用いた宇宙機システム運用シナリオ評価
Author(s)	染谷, 一徳
Citation	
Issue Date	2026-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	https://hdl.handle.net/10119/20597
Rights	
Description	Supervisor: 青木 利晃, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	染谷 一徳
学 位 の 種 類	博士 (情報科学)
学 位 記 番 号	博情第 584 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 8 年 3 月 25 日
論 文 題 目	SysML メタモデルを用いた宇宙機システム運用シナリオ評価
論 文 審 査 委 員	青木 利晃 北陸先端科学技術大学院大学 教授
	平石 邦彦 同 教授
	富田 堯 同 准教授
	岸 知二 早稲田大学 教授
	岡本 圭史 仙台高等専門学校 教授

論文の内容の要旨

Spacecraft system development faces new operational challenges, such as adapting to new mission concepts and supporting multi-spacecraft constellation operations that require greater autonomy and reduced workload. At the same time, high operational reliability is essential because repairs in space are extremely difficult. Therefore, engineers must share a common understanding of operations from the early development phase by defining and reviewing operational scenarios. However, scenarios represented by activity diagrams often become large and complex, especially when off-nominal states with many variations are included, making them difficult to review and increasing the risk of design inconsistencies and missing requirements.

This study aims to improve the reviewability of operational scenarios by (i) enabling compact representation of large scenarios in activity diagrams and (ii) enhancing review coverage through exhaustive enumeration of state transitions and execution paths for off-nominal scenarios derived from a single nominal scenario. These capabilities are realized within a model-based development framework using three proposed metamodels: the operational layer definition metamodel, the operational stereotype metamodel, and the operational abnormal event metamodel integrated with STAMP/STPA safety analysis.

In the compact representation method, behaviors that have low review value and are already commonly understood are defined as common behaviors using stereotypes. By applying these stereotypes to action elements in activity diagrams in an annotation-like manner, known behavioral portions can be omitted. Removing such action elements reduces the number of elements and achieves a more compact representation. As a result, diagrams can be generated without requiring scrolling, improving visibility, enabling an overall view of the scenario, and facilitating intuitive understanding and effective review of essential aspects. However, among the omitted information, elements necessary for review are preserved as tagged values. Furthermore, a method is included to verify stereotypes and tagged values from a review perspective, ensuring that all information required for review is retained.

For the generation of off-nominal scenarios, the nominal scenario is analyzed using STAMP/STPA, and the results are represented in a SysML model and integrated into the MBSE framework. To derive off-nominal scenarios from the nominal scenario, we propose the concept of a join point, inspired by aspect-oriented approaches. Join points are

defined within the nominal scenario, and unexpected abnormal scenarios (e.g., unsafe control actions and unsafe scenarios) derived from STAMP/STPA analysis are inserted at these points. This enables branching from the nominal scenario to abnormal states, thereby generating off-nominal scenarios.

In addition, to comprehensively review transitions to unexpected abnormal states, execution paths are explored from a single scenario, and all possible state transitions are enumerated and represented as a graph. Execution paths are exhaustively enumerated using a SAT-solver-based approach. Inspired by the path exploration mechanism of bounded model checking, we implement a SAT-solver-based approach to enumerate feasible execution routes and state transitions, which we refer to as Bounded Search.

Experiments using representative JAXA spacecraft scenarios show that the compact representations reduce both the number of elements and the required screen area by approximately 50%, enabling activity diagrams to fit within approximately a single A4 page, thereby improving review visibility. Furthermore, off-nominal scenario analysis revealed previously unanticipated transitions, demonstrating that the proposed approach provides effective design feedback and contributes to improved spacecraft system reliability.

Keyword: Spacecraft operation; Model-based systems engineering; review; activity diagram; compaction; Bounded model checking; SAT solver

論文審査の結果の要旨

本論文は、宇宙機システムの運用シナリオを対象として、SysML を用いてレビュー容易性および網羅性の向上を図る手法を提案するものである。宇宙機システムでは、様々な状況を事前に想定して運用を細かく規定し、それから逸脱しない形式で実際に運用するという特徴がある。そのため、宇宙機システム開発時に規定する運用シナリオは膨大で、アクティビティ図で視覚的に記述すると数千ページ規模となり、レビューが困難であるという課題がある。

そこで、本論文では、まず、アクティビティ図で記述された膨大な運用シナリオをコンパクトに記述する手法を提案している。適切なサイズの紙面や画面上で、意味的にまとまりのある運用シナリオを表現することにより、レビュー容易性の向上、さらにはレビュー有効性の向上を目指すものである。具体的には、宇宙機システムの領域知識の整理とモデル化を行い、それに基づいたステレオタイプを提案している。提案したステレオタイプ群は、メタモデルとして明確に定義されている。一方で、単に情報量を削減するだけでは、重要な情報まで失われる可能性がある。そこで、本論文では、レビューに必要な情報を整理した上でモデル化を行っている。さらに、そのモデルに出現する情報と提案したステレオタイプを対応付けることにより、コンパクト化を行った場合でも、重要な情報が保持されることを保証している。この点は、本研究の新規性の一つであり、実践的にも興味深い着想である。いくつかの実験を通じて、提案手法によるコンパクト化の有効性が確認されている。

次に、本論文では、安全解析手法 STAMP/STPA と連携したオフノミナルシナリオ評価手法を提案している。STAMP/STPA により非安全な動作およびシナリオを識別し、ノミナルシナリオにおいて非安全なシナリオを挿入すべきポイントを明確化している。これらをアスペクト指向の考え方に基づいて組み合わせることにより、多様な潜在的動作パターンを含むオフノミナルシナリオを生成している。さらに、有界モデル検査の考え方を応用し、SAT ソルバによる状態探索を用いて、これらの動作パターンを網羅的に列挙する手法を提案している。一連の手法は、SysML 上で統一的に扱えるよう、メタモデルとして定義されている。また、いくつかの実験を通じて、提案手法により潜在的なリスクを識別可能であることを示している。安全解析手法、アクティビティ図に基づくシナリオ分析、SAT ソルバによる状態列挙という複数の技術を組

み合わせて、一連の評価手法として体系化している点は、新規性および有効性の観点から高く評価できる。

以上のように、本論文は、宇宙機システムの運用シナリオ設計およびレビューに関する実践的課題に対し、SysML メタモデル、安全解析、モデル検査技術を統合した独自の評価手法を提案し、その有効性を実例に基づいて検証している。

以上、本論文は、宇宙機システムの運用シナリオに対するレビュー容易性および網羅性の向上手法について体系的に提案し、その有効性を実験により検証したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（情報科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。