

オントロジーを用いた人工衛星の網状故障解析

Fault Network Analysis of Artificial Satellite Using Ontology

山口 皓太 *¹ 堀 浩一 *²
 Kota Yamaguchi Koichi Hori

*¹東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
 Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo

This study was made to analyze faults of an artificial satellite by using reliability engineering and ontology engineering. This paper suggests a fault analysis method, which is based on a combination of descriptions of connections between devices and flows of something transmitted in an artificial satellite and descriptions of failure events of devices.

1. 序論

1.1 背景

人工衛星の設計開発は大規模であるため、複数の開発部署に分かれて行われる。しかし、人工衛星の設計段階、組み上げ段階、運用段階においてそれぞれの設計開発部署が開発する人工衛星の知識の共有・伝達が上手く為されなければ、異なる開発部署間での部品のかみ合わせ時やシステム運用時において不具合が生じ、開発コストやスケジュール、人工衛星のミッションの遂行に影響がでてしまう。

東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻中須賀研究室では学生主体の小型人工衛星開発プロジェクト (PRISM プロジェクト) が行われている [3]。このプロジェクトの開発規模は NASA や JAXA のプロジェクトと比較すると、開発メンバーの人数、人工衛星の構成部品数、開発期間などがどれも小規模であるが、人工衛星の設計、製作、試験、運用までを行っており、人工衛星の設計開発・運用モデルとして参考にできる。

1.2 目的

本研究では PRISM プロジェクトにおいて蓄積されたデータを基に、オントロジー工学と信頼性工学の立場から、人工衛星の設計開発・運用における知識の内、不具合知識に焦点を置き、人工衛星設計開発に関する知識の共有・伝達を支援する故障解析手法の構築を試みた。

2. 提案する故障解析システム

2.1 提案システム概要

本研究で提案する故障解析手法は主に二つのオントロジー記述によって表現されたシステムによって構成される。一つは人工衛星の内部状態を記述した人工衛星デバイスオントロジーであり、もう一つは人工衛星の故障を担う故障プロセスオントロジーである。この二つのオントロジーを用いて故障解析を行う。

2.2 衛星設計プロジェクトの現状

中須賀研究室における人工衛星 PRISM 設計開発ではシステム開発は六つのパートに分かれて行われた。六つのパートとは CDH 系, 光学系, 通信系, 電源系, ADCS 系, 構造系である。これらの各パートで発生した異常と故障は、リスト形式で記述された.xls ファイルと、個別の不具合について詳細に書かれ

た.doc ファイルという形で保管されている。これらの不具合が記述されたデータを分析すると、不具合の記述がその記述者の設計開発パートを中心とした視点で行われているため、記述者の開発する系における不具合の波及については詳しく記述されているが、他の系への不具合の波及に関する記述は少ない。これは設計開発において稼働試験を行う際には全体を組み上げて行うのではなく、人工衛星の限定した部分に対して行っているためであると考えられる。そこで本研究で提案する手法を用いることで、各系ごとに存在する不具合の繋がりを明らかにし、不具合知識の統合を行う。

2.3 オントロジーエディタ『法造』

本研究においてシステムの構築のベースとして、オントロジー工学の成果を用いた。オントロジー理論は溝口の研究を参考として、オントロジーの構築を行った。オントロジーの構築にはオントロジー構築利用環境「法造」[4]を使用した。

2.4 人工衛星デバイスオントロジー

本研究で用いる人工衛星デバイスオントロジーは来村 [1] らによって提案された拡張デバイスオントロジーをベースとし、また澤井 [2] の人工衛星オントロジーからの一部引用を行った。

2.4.1 全体物と部分品

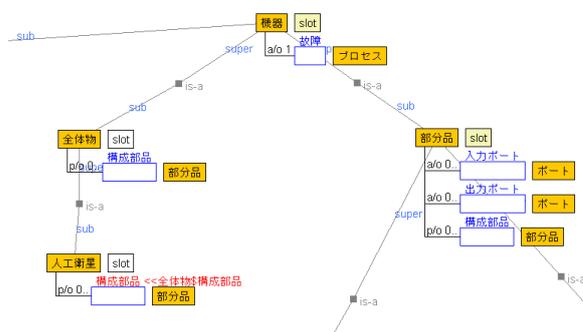


図 1: 全体物と部分品の定義

図 1 において、「機器」は「全体物」と「部分品」によって分けられている。全体物は部分品の組み上げによって形作られる最終的な機器の形である。部分品は全体物を構成する基本的な構成単位である。本研究においては衛星システムを運用する

連絡先: 山口皓太, 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻, yamaguchi@ailab.t.u-tokyo.ac.jp

上で重要となってくる機能部品単位に着目してオントロジーの作成を行った。

2.4.2 ポートの間接入力元と間接出力先

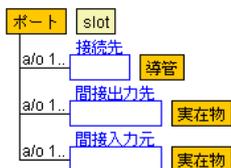


図 2: ポートの定義

図 2 が「ポート」概念の定義である。ポートは部分品が持つ属性である。ポートは「接続先」として「導管」、実在物をクラス概念として持つ「間接入力元」「間接出力先」を持つ。ポートと導管の概念は来村 [1] らの拡張デバイスオントロジーの理論から導入した。「間接入力元」と「間接出力先」という概念は本研究のオントロジーでにおいて新たに導入したものである。人工衛星の内部構造は多くの複雑な電子部品によって構成されており、データや電気エネルギーの流れる経路は複雑に入り組んでいる。そのような複雑系をオントロジーで完全に記述することは困難である。本研究で用いる人工衛星の設計データでは細部の構造の把握が困難であったため、オントロジーの記述に曖昧さをもたらす必要があった。

そこで接続関係の曖昧さを表現するために、「間接入力元」と「間接出力先」という概念を導入した。間接入力元とは、伝達物が入力されている部分品から見て直近の接続関係にある、その伝達物を出力している部分品を指す概念である。間接出力先とは、間接入力元とは逆に、伝達物を出力している部分品から見て直近の接続関係にある、その伝達物が入力されている部分品を指す概念である。これら二つの概念を導入することで、人工衛星の内部構造の記述を簡便化した。

2.4.3 導管

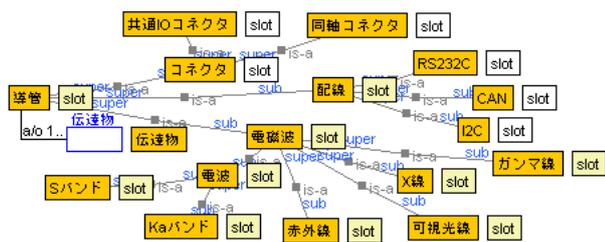


図 3: 導管の定義

図 3 が導管の定義である。「導管」は部分品間の接続はどのようなものが媒体となるかを表現する。大きく「配線」、「コネクタ」、「電磁波」に分類される。配線とコネクタは人工衛星内部の部分品の接続媒体であり、電磁波は人工衛星が外部との接続を行う際の媒体である。

2.4.4 伝達物

図 4 が「伝達物」概念の定義である。「伝達物」は「導管」上で移動、受け渡しされる対象を表現する。エネルギーや情報に

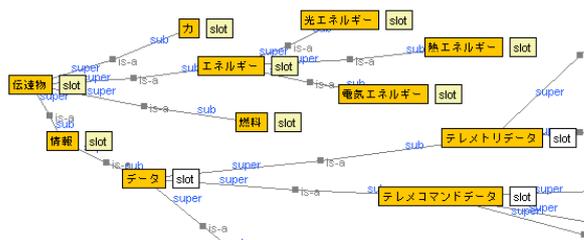


図 4: 伝達物の定義

限らず、力等の、通常は管を通る物としてイメージされない対象も含む。

2.5 故障プロセスオントロジー

故障解析に用いるもう一つのオントロジーとして、故障プロセスオントロジーを作成した。

2.5.1 故障の定義

本研究では故障という事象を『プロセスによって担われるロール』であると定義した。ここで用いる「プロセス」とは行為や状態、状況といったオカレントなものを指す。故障は想定しているプロセスによって、そのプロセスが故障であるかどうかの線引きが行われる。例えば、ある機器に数値を入力する場合において、特定数値以上を入力することがエラーという故障であるとする。ここでは、入力値の範囲によって故障であるかそうでないかの線引きがなされている。すなわち、この場合の故障の本質は入力値状態というプロセスであり、入力値状態がエラー故障という事象の役割を担っている。また、この例における機器の正常動作も入力値状態によって担われる。正常動作においてはこの入力値状態が想定しているものである。つまり、機器の故障も正常動作も本質的には同一のプロセスによって担われうるものである。

2.5.2 波及

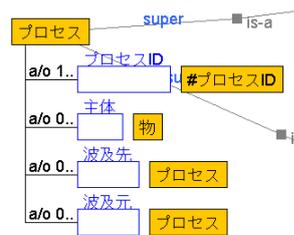


図 5: 波及先と波及元の定義

機器の故障を具体的に考えると、機器が作動しない、機器の性能不良、機器の出力値異常などが挙げられる。そしてその原因として、配線ミス、入力ミスなどのヒューマンエラーや、機器のショート、機器の接触不良などのマシンエラーが推定される。また、それらの原因もまた原因を持つ場合が存在する。例えば、入力ミスはその入力を行う者の注意不足が原因であったり、この注意不足も分析すると寝不足が起因していると考えられることがある。つまり、故障とは原因が原因をもたらすことの連鎖の結果であると考えられる。

そこで、本研究において故障を記述する上で、「波及」という概念を導入した。故障の役割を担うプロセスは属性として他の

プロセスをクラス概念に持つ「波及先」と「波及元」を持つ。図5にプロセスの属性である、「波及先」と「波及元」を示す。この概念の導入により、故障を客観的に記述可能となる。

2.5.3 その他属性

プロセスの持つ属性として、「波及先」と「波及元」以外に、プロセスそれぞれにつけられた属性としてのIDを示す「プロセスID」とプロセスが何によってなされているかを示す「主体」を用意した。これらは図5に示されている。

3. 提案する故障解析手法

3.1 アルゴリズム

故障プロセスオントロジーと人工衛星デバイスオントロジーの二つを用いることで、データ上繋がり的人工衛星の不具合データ同士の新たな繋がりを見つけ出すことを目的に作成した。

提案手法で用いられる故障プロセスとは、故障の伝達機能の停止や阻害を直接表現するプロセスであり、人工衛星オントロジーによって識別がなされている。本研究で用いる故障解析には波及先探索と波及元探索が存在する。

3.1.1 波及先探索アルゴリズム

1. 対象となるプロセスと注目する伝達物を選択する。
2. 対象となるプロセスの既に構成されている波及先のプロセスを検索する。
3. 検索された波及先プロセスに対して、波及先のプロセスを検索する。
4. 3.を繰り返す。波及先が存在しない場合、波及先に既に3.において検索されたプロセスと同じプロセスが存在する場合中止する。
5. 対象となるプロセスが故障プロセスの場合、主体プロセスを検索する。対象となるプロセスが故障プロセスでない場合、同一主体を持つ波及先において故障プロセスが存在するならば、主体プロセスを検索する。どちらにも該当しない場合、主体の検索は行わない。主体の検索がなされた場合、次の手順に移行する。
6. 直近の注目する伝達関係に基づく上流の接続関係にある機器を検索する。複数検出された場合は、順次以下の7.から9.を行う。何も検出されなかった場合は探索を中止する。
7. 6.において検索された機器を主体とする故障プロセスを検索する。
8. 対象となるプロセスを波及元,7における故障プロセスを波及先として波及関係を構築する。
9. 6.から8.を繰り返す

3.2 波及元探索アルゴリズム

1. 対象となるプロセスと注目する伝達物を選択する。
2. 対象となるプロセスの既に構成されている波及元のプロセスを検索する。
3. 検索された波及元プロセスに対して、波及元のプロセスを検索する。
4. 3.を繰り返す。波及元が存在しない場合、波及元に既に3.において検索されたプロセスと同じプロセスが存在する場合中止する。
5. 対象となるプロセスが故障プロセスの場合、主体を検索する。対象となるプロセスが故障プロセスでない場合、主体の検索は行わない。主体の検索がなされた場合、次の手順に移行する。
6. 直近の伝達関係に基づく下流に存在する接続関係にある機器を検索する。複数検出された場合は、順次7.から9.を行う。何も検出されなかった場合は探索を中止する。

7. 6.において検索された機器を主体とするプロセスを検索する。
8. 対象となるプロセスを波及先,7におけるプロセスを波及元として波及関係を構築する。
9. 6.から8.を繰り返す

特定の人工衛星を構成する機器におけるプロセスが、人工衛星という複雑な部品の接続関係のネットワークの中において、他の機器に対してどのような故障をもたらすのか、そしてそのプロセスがどのような他のプロセスによって引き起こされるか、影響の波及元と波及先の両方面での故障解析を行う。

4. 提案手法の実験と評価

4.1 実験方法

提案した故障解析手法を用いて、注目するプロセスが他の機器、プロセスに対してどのような波及をもたらすのか実験を行った。紹介したアルゴリズムにおける機器の接続先探索の繰り返しを本実験では3回行う。

4.2 実験資料

実験に用いる資料は中須賀研究室の人工衛星 PRISM 開発プロジェクト [3] において蓄積されたドキュメントデータの集合を用いる。本実験においてはこのドキュメントデータの集合に含まれる不具合に関するデータを整理したものを故障解析にかける。表1,表2に不具合データの一部を記載する。

本実験ではID:82の『磁気センサ機能不良』というプロセスに対して、波及先探索アルゴリズムを適用し、ID:19の『MGTセンサ系マルチプレクサにノイズがのる』というプロセスに対して、波及先探索アルゴリズムを適用して実験を行う。なお、故障解析の過程で着目する伝達物は、ID:82では「磁気センサデータ」に着目して機器間の経路を辿り、ID:19では「磁気センサデータ」の上位概念に当たる、「センサデータ」に着目して経路を辿ることとした。

プロセス ID	プロセス
18	AD コンバータの AD 変換の出力値異常
19	MGT センサ系マルチプレクサにノイズがのる
52	磁気センサデータ出力値異常
53	磁気センサ用オペアンプ性能不良
54	Circuit レベルでの磁気センサ出力端子名間違い
75	温度センサの電流浪費
76	温度センサのコネクタ接続間違い
78	温度センサデータ出力値異常
79	ジャイロセンサデータ出力値異常
80	温度センサの機能不良
81	ジャイロセンサの機能不良
82	磁気センサの機能不良
89	磁気センサの出力にノイズがのる
95	ジャイロセンサの出力停止
96	ジャイロセンサの振動による破壊
97	ジャイロセンサの真空での破壊
98	ジャイロセンサの放射線による破壊
99	ジャイロセンサのショート
100	ジャイロセンサの振動による断線
101	ジャイロセンサの半田付け不良による断線
104	ジャイロセンサの熱膨張によるアライメントエラー
105	磁気センサの内部磁気発生状態

表 1: プロセスデータ

プロセス ID	波及先プロセス ID	波及元プロセス ID
18	15,16,17	19,21,22,37,38,53,107
19	18	20
52		53,82,89
53	18,52	
54		
75		76
76	75	
78		80
79		81
80	78	83
81	79	83102103104
82	52	83
89	52	105
95		96,97,98,99,101
96	95	100
97	95	
98	95	
99	95	
100	96	
101	95	
104	81	
105	89	

表 2: 既存の波及関係データ

4.3 実験結果

4.3.1 実験 1: 『磁気センサの機能不良』への波及先探索アルゴリズムの適用

ID:82 への波及先探索アルゴリズムの適用した場合の実験結果を記述する。本実験で接続関係を形成する上で着目する伝達物は「磁気センサデータ」である。ID:82『磁気センサの機能不良』から ID:52,53,19,18 が波及先のプロセスであると検出された。

4.3.2 実験 2: 『MGT センサ系マルチプレクサにノイズがのる』への波及元探索アルゴリズムの適用

ID:19 への波及元探索アルゴリズムの適用した場合の実験結果を記述する。本実験で接続関係を形成する上で着目する伝達物は「センサデータ」である。ID:19 の波及元として、「磁気センサ用オペアンプ」主体のプロセス, ID:53, 「ジャイロセンサ」主体のプロセス, ID:95,96,97,98,99,100,101,104,79,81, 「温度センサ」主体のプロセス, ID:75,76,78,80, 「磁気センサ」主体のプロセス, ID:52,54,82,89,105, が検出された。

4.4 評価

4.4.1 結果 1: 『磁気センサの機能不良』への波及先探索アルゴリズムの適用

ID:82 から ID:52,53,19,18 が波及先のプロセスであると本研究で用いたアルゴリズムは導き出した。この四つの故障プロセスのうち、中須賀研究室で作成された不具合データを元に構築された故障プロセスオントロジーに既に波及関係が記述されている不具合 ID:52 を除いた、三つの故障プロセスが本研究により構築された新たなプロセス間の繋がりとと言える。得られた結果を分析すると, ID:53,19,18 はどれも, ID:82 から引き起こされる事象なりうるプロセスだとみなすことが可能である。

4.5 結果 2: 『MGT センサ系マルチプレクサにノイズがのる』への波及元探索アルゴリズムの適用

「磁気センサ用オペアンプ」を主体とする波及元プロセスとしての ID:53 は既に構築されている関係である。「ジャイロセンサ」を主体とするプロセスについて考えると, ID:95 に

よって、ノイズが発生することは考えられないので、これは求める検索の結果ではない。しかし, ID:95 の故障プロセスオントロジーにおける波及元である ID:96,97,98,99,100 は間接的なノイズの発生の可能性を有すると考えられる。これはプロセスの新たな繋がりである。また, ID:101,102,103,104,81,79 もノイズの間接的発生要因として考えられる。しかし、これらの波及元の可能性のあるプロセスは直接的にノイズを発生させ、ノイズが配線を伝わることで、マルチプレクサにノイズをのせているものであると断言できるものではなく、繋がりととしては薄いと言わざるを得ない。次に「温度センサ」を主体とするプロセスについて考えると、特に ID:76,78,80 はノイズの発生と強い繋がりを持っていると考えられる。検索結果としては、非常に良好である。「磁気センサ」主体のプロセスの検索結果は、非常に良好なものであった。ID:52 と故障プロセスオントロジーに基づく波及元である ID:89 は、ノイズの発生に強く結びついたプロセスである。また, ID:105, ID:82 もノイズの発生原因として、非常に有力な候補である。ID:54 はノイズの発生とは繋がりが薄い候補の一つとして考えられる。

5. 結論

5.1 本研究の成果

提案した故障解析手法を用いて、不具合データの解析を行い、蓄積されたデータ上に繋がりのなかった故障事象の間に新たな繋がりを構築することができた。また、オントロジーの構築を通して故障という事象に対する理解を深めることができた。

5.2 今後の課題

人工衛星デバイスオントロジーは人工衛星の詳細な内部構造の記述を目指したが、筆者の知識不足と資料の不足のため、完全なものとすることはできなかった。そのため、冗長な記述を用いて対処することとなった。記述の詳細化が今後の課題の一つと言える。また、故障プロセスオントロジーも、プロセスの記述に曖昧な部分があるため、故障解析における検索の絞込みに甘さが目立った。より詳細な体系化が課題である。

参考文献

- [1] 来村徳信, 溝口理一郎 (2002) 「オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み」, 『人工知能学会論文誌』, vol.17, No.1, pp.61-72
- [2] 澤井裕一郎 (2012) 「人工衛星の設計支援のためのオントロジーの構築と利用」
- [3] 「東京大学 ISSL:PRISM プロジェクトサイト - 中須賀研究室」 <http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/prism/main.html> (2013/11/20 アクセス)
- [4] 「[法造]によるオントロジー研究サイト」 <http://www.hozo.jp/hozo/> (2013/11/12 アクセス)
- [5] 溝口理一郎 (2006) 「オントロジー構築入門」, オーム社
- [6] 溝口理一郎 (2005) 「知の科学オントロジー工学」, オーム社