

人工衛星の設計支援のためのデバイスオントロジーの拡張 —デバイス自身への作用の必要性とその記述方法の提案—

Expansion of Device Ontology for Satellite Design

川井 翼 堀 浩一
Tsubasa Kawai Koichi Horii

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

In previous device ontologies for physical systems, devices and objects are explicitly separated and devices can only affect objects. For representation of artificial satellites, devices should be allowed to affect themselves or each other. In this study, we show it and propose expansion of device ontology. We have also built a system which utilizes the expanded ontology and made a model of attitude control system of a satellite as an example.

1. 序論

1.1 研究背景と目的

近年、コンピュータを用いた設計支援ツールの開発が盛んに行われており、その中でもオントロジー工学と呼ばれる分野では、対象領域によらず一貫性のある再利用可能な設計知識を記述するための研究がなされている。物理システムおよびその設計知識をオントロジーとして記述する研究例としては、[Kleer 84, Borst 95, 関谷 99, 来村 02] などがある。これらの研究では特定の設計対象によらず、汎用的に物理システムをモデル化するための枠組みが提案され、実際にそれを用いた設計支援ツールを作成している。また、これらの研究成果を人工衛星の設計支援に対して適用を試みた研究として [澤井 13] がある。本研究では、従来研究におけるモデル記述方法では人工衛星の特に姿勢系システムの記述において不十分である点を指摘し、その問題点を解決するような記述方法の拡張を試み、提案する記述方法に基づく設計支援ツールと挙動シミュレータの作成を行った。

2. 物理システムのためのオントロジー

本研究では、オントロジーの基本的な部分については、溝口のオントロジー理論 [溝口 05, 溝口 12] に基づいている。

2.1 プロセスオントロジーとデバイスオントロジー

物理システムを記述するためのオントロジーは、[来村 04] によれば、大きく二種類に分けることができる。一つ目は、入力ポートから入った入力物を出力物に変換して出力ポートから出す「デバイス」を中心に据えて、デバイスの組み合わせによってシステムを記述するデバイスオントロジーである。二つ目は、物理現象を引き起こす「プロセス」を中心に据えて、人工物はプロセスへの参加者として表現されるプロセスオントロジーである。

人工衛星のモデルを記述する上では、センサーやアクチュエータなどが独立したコンポーネントとして存在していること、人工衛星において重要な位置を占めるセンサーや制御アルゴリズムなどの情報処理系は物理プロセスでは記述できないことから、本研究では [澤井 13] と同様に、デバイスオントロジーを採用し、その中でも「情報」も対象物として考えている拡張デバイスオントロジーの考え方を基本とした。

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

2.2 拡張デバイスオントロジー

[来村 02] の拡張デバイスオントロジーにおいては、世界を「デバイス」と「対象物」に分け、「デバイス」が持つ「ポート」から、それらを繋ぐ「導管」を通して「対象物」を入出力する、と記述される。厳密には、これらに加えて対象物と導管のうち、他の対象物を内部に保持して伝達する役割を果たすものを、「媒体」というロール概念で表すが、本研究では特に「媒体」については考えないこととした。図 1 に、この表現方法による太陽電池の記述例を示す。

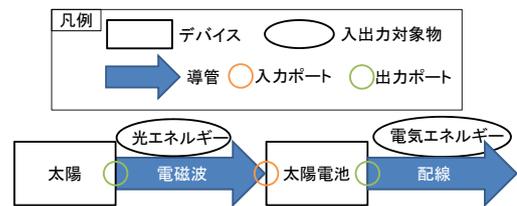


図 1: デバイスオントロジーによる「太陽電池」の表現例

3. 提案する記述方法

3.1 デバイス自身に対する作用の必要性

拡張デバイスオントロジーでは、対象世界をデバイスと、デバイスに入出力される対象物に明確に分けており、デバイスは対象物に変化をもたらすが、デバイス自身がその影響で変化することはない。しかし、人工衛星などの航空宇宙システムにおいては、推進系デバイスによる速度変化や姿勢制御系デバイスによる姿勢変化、ヒーターによる温度変化など、システム自身への作用が重要であり、これらを記述する必要がある。

このようなシステム自身への作用を、従来のデバイスオントロジーで (デバイスの振る舞いを対象物を変化させることに限定して) 記述しようとする、例えば姿勢変化の場合、

- デバイス自身も対象物に含め、別のデバイス (あるいは自分自身) にトルクとともに入出力することでデバイスの属性である「姿勢」の変化を与えると記述する。
- デバイスの属性である「姿勢」自身を入出力の対象物とする。

のような方法が考えられるが、どちらも結局姿勢変化のためだけの新たなデバイスを導入して記述することになるうえ、そも

そもデバイスと対象物を分離した意味が失われる。しかもその新たなデバイスは実際には存在しない架空のデバイスであり、力やトルクを受けるデバイスごとに記述する必要があるため、結果として、記述されたシステムモデルが煩雑になる。

そこで、デバイスが入力物を出力物に変換する過程で自身の属性も変化することを許容することで、モデルが煩雑になることを避ける。本研究では、これらの作用のうち、特に力学系(並進運動と回転運動)の作用について記述可能にすることを試みた。

3.2 作用・反作用の法則に基づいた力、トルクの記述の必要性

デバイス自身への力学的な作用を記述する際には、自身に働く力、トルクの記述が必要となるが、安易に力、トルクを出力物として記述することには問題があると考えられる。ここでは、その例として、ロケットエンジンとリアクションホイールを挙げる。

3.2.1 ロケットエンジンの場合

まず、ロケットエンジンを単純に推進剤を入力して、加速された推進剤を出力するだけのデバイスであると簡単化する。このとき、ロケットエンジンが推力を得るためのものであると、ロケットエンジンの出力に力を記述することには問題がある。なぜなら、推力を得るという状態は、運動量を持った推進剤を「系外」に出力することによる反作用によるものであり、また、推進剤の放出により力を得るのはエンジン自身であるため、「力」は他のデバイスへ出力される物ではないからである。

つまり、ロケットエンジンの出力は、「運動量を持った推進剤」であり、その反作用として「自身に対する力」の発生があると考えられるべきである。同様に、入力として「運動量を持った物体」を得ると、それを系内に受け入れると考え、反作用として「自身に対する力」が発生すると考える。これにより、ある「運動量を持った物体」が系内の二つのデバイス間を流れる場合、入力元と出力先それぞれで得る反作用が打ち消しあうことで、系全体としては力の発生が無いことが記述でき、出力が系外に繋がっていた場合は、出力先で得る反作用というものが無くなるため、系全体として力の発生があることが記述できる。これを図にすると図2のようになる。

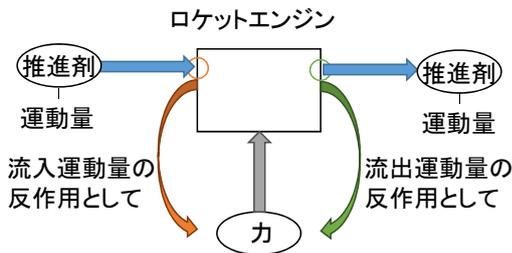


図 2: 提案手法によるロケットエンジンの入出力の記述のイメージ

3.2.2 リアクションホイールの場合

リアクションホイールの原理は、内部のホイールの回転数をモーターの駆動によって変化させることで外側から見てその相対角運動量変化分のトルクを得ているように感じるというものである。ロケットエンジンと同様に、発生トルクは自身が受ける反作用であるためトルクは出力物として適切ではないが、こちらは「作用」に対応するものが「推進剤」のような出力物では無い。そこで、本研究では、デバイスが内部に何らかの形

で相対角運動量を持つことをブラックボックスとして許容し、それを変化させることでデバイスの外側から見る限りにおいて反動トルクを受けると記述することとした。

つまり、ブラックボックスとしてのリアクションホイールは、「電力を入力し、蓄積内部角運動量が変化し、その反動分のトルクを受けるデバイス」となる。

3.2.3 保存則による自身への作用の記述

本研究ではこのような作用反作用の法則に基づく力、トルクの発生を運動量保存則、角運動量保存則といった物理量の保存則をベースに記述する。具体的には、

$$\text{自身への作用} = \text{入力された量} - \text{出力した量}$$

として計算するものである。また、リアクションホイールの内部角運動量変化のように、デバイス内部での変化も出力量として含み、あくまでも外から見た量に対する作用として計算する。本研究で実装したのは運動量、角運動量、質量、電荷の保存則である。エネルギー保存則については、散逸の形態が様々であり、全てを記述するのは困難であることと、設計においては単に「効率 90%」のように記述されることが多いことから、導入を見送った。

3.3 座標系の導入の必要性

デバイスの「位置」「姿勢」や、その変化をもたらす「力」「トルク」を記述するためには、座標系の概念を導入し、ベクトル量として記述することが必要である。また、デバイス同士の相対運動を記述するためには座標系間の拘束条件が必要となる。これらの概念はプロセスオントロジーベースの研究では重要なものであり、物理プロセススペースの統合的設計支援環境 KIEF[関谷 99]でも座標系の概念がオントロジーとして導入されており、[Horváth 98]のように座標系と拘束のオントロジー自体に関する研究もある。本研究では、デバイスごとに固定座標系を持たせることでそれら座標系間の関係として「位置」「姿勢」などを表現する。

3.4 提案手法のその他の特徴

上記以外にも、主な特徴として以下のような点が挙げられる。

- デバイスのポート間の入出力対象物の伝達は「導管」によって行われる。導管は、入力元ポートと出力先ポートの開閉状態などから、実際にその接続で伝達される量を計算する。
- デバイスと座標系の階層構造の端点として、最上位の仮想的な慣性座標系およびデバイスとして「最上位仮想慣性系」と「最上位仮想デバイス」を定義する。
- デバイスと上位のデバイスの拘束関係として、本研究においては簡単のため 6 軸自由拘束(慣性系と衛星座標系など)と、6 軸固定拘束(衛星座標系とエンジン座標系など)のみを定義する。
- 系外への接続であることを明示するために、「系外」を抽象的な接続先として用意する。

4. 設計支援ツールおよび挙動シミュレータの作成

前節で述べたオントロジー記述方法に基づいて、設計支援を行うためのツールを作成した。このツールによって、デバイスやポートを配置して座標系や各種パラメータを設定することで

システムのモデルを記述することができる。また、デバイスの内部挙動をスクリプトとして与えることで、その挙動をシミュレートすることもできる。図3は、システムを編集するための画面である。図内では、システムに追加するデバイスを選択するダイアログが開かれている。システムを構成するサブデバイスは白塗りの四角の中にデバイス名を入れて表し、系外のデバイスは灰色の四角で表している。ポートは円で表されており、入力ポートは赤く、出力ポートは青く塗られ、ポート名が上部に記される。導管は楕円で表されており、伝達する入出力対象物の名前が中に表示される。

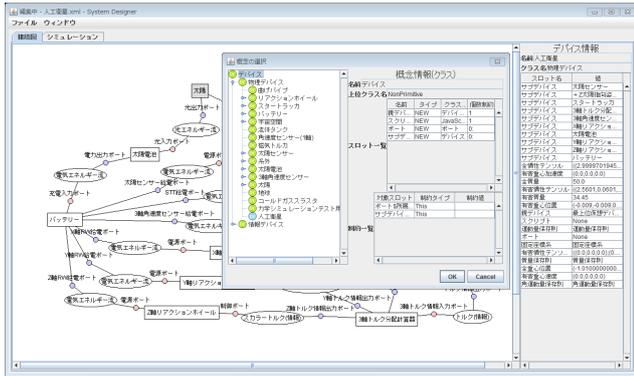


図 3: システムの編集画面

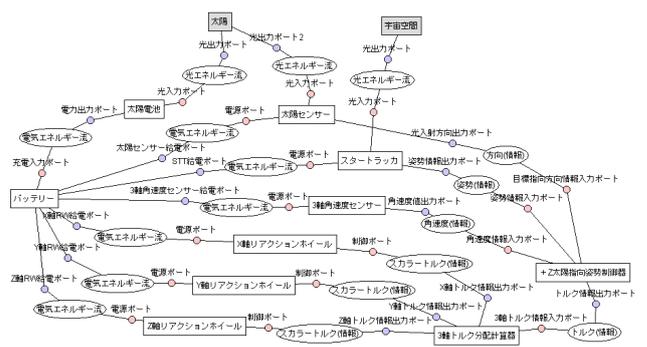


図 4: 記述したモデルの接続図

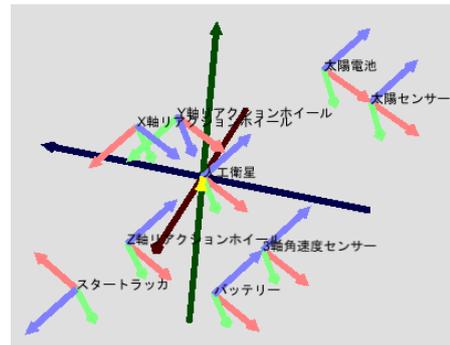


図 5: 記述したモデルのデバイス配置

5. 作成したツールの利用例

提案手法により人工衛星のモデル化が可能であることを示すため、簡単な人工衛星の姿勢制御系のモデルを構築した。

5.1 記述対象

記述対象とするシステムは、以下のような人工衛星の姿勢制御系のデバイスモデルである。

- センサーとして、太陽センサー、スタートラッカおよび3軸角速度センサーをひとつずつ持つ
- アクチュエータとして、機体 X,Y,Z 軸それぞれの軸周りに回転するリアクションホイールを持つ。
- 電源系として、機体 Z 軸正方向を向いた太陽電池と、バッテリーを持つ。
- 制御系として、機体 Z 軸正方向を太陽方向に向けるための姿勢・角速度による PD 制御のアルゴリズムを持つ。
- 系外のデバイスとして、太陽、宇宙空間を用意する。

設計対象のイメージとしては、一辺が 50[cm] 程度の立方体で、全質量が 50[kg] 程度であるような小型衛星である。モデルを記述できることを示すのが主目的であるため、各機器の詳細なパラメータについては、[茂原 02] を参考にだまかに値を設定した。また、各センサー、アクチュエータは観測誤差、出力誤差などをスクリプトとして組み込んでいる。記述した人工衛星モデルの、デバイス間の接続図を図4に、各サブデバイスの座標系配置を図5に示す。暗い赤、緑、青の矢印が慣性系の X,Y,Z 軸であり、明るい赤、緑、青の矢印が各デバイスの X,Y,Z 軸である。また、黄色で表されているのは機体の全重心位置である。

5.2 シミュレーション結果

以上のモデルに対して、人工衛星が太陽指向を行う挙動のシミュレーションを行った結果の一部を以下に示す。

5.2.1 太陽方向の推移

図6に、機体座標系における太陽方向のグラフを示す。記述したモデルでは、機体座標系の+Z方向を太陽に向けるPD制御則が組み込まれており、正しく制御が行われていることが分かる。

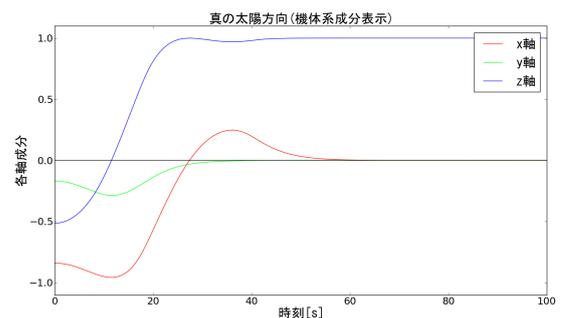


図 6: 太陽方向の推移

5.2.2 トルク制御値と発生トルクの推移

図7と図8に、制御系で計算したトルク制御値と、リアクションホイールによって実際に機体が得たトルクのグラフを示す。記述したリアクションホイールのモデルは出力トルクの上限を定めているため、それを越えた制御値はカットオフされている。また、値にノイズが乗っているのは、各デバイスの観測、出力誤差が反映されているためである。

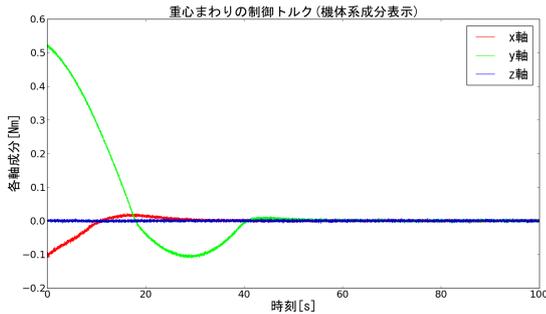


図 7: トルク制御値の推移

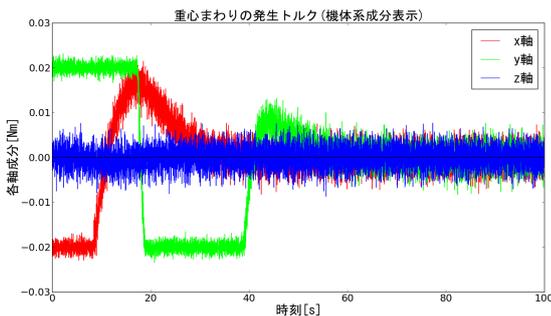


図 8: 実際の発生トルクの推移

6. 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、従来の物理システムに関するオントロジーにおいて、人工衛星のモデル記述に適用する際に不十分であった点を指摘し、それらの問題点を解決できるようなデバイスオントロジーの拡張を試みた。これにより、

- デバイスのブラックボックスとしての記述を保ったまま、入出力される対象物の変化からデバイス自身が受ける反作用を求め、デバイス自身にも変化が発生することを記述できるようになった。
- デバイスに固定座標系を導入し、座標系間の関係としてデバイスの位置・姿勢などを定義することで、角速度センサーや太陽センサーなどのデバイスの位置・姿勢に関わる観測機器を適切に記述できるようになった。
- スクリプトによるシミュレータを実装し、提案手法によるシステムモデルに対してシステム自身のデバイス単位での力学的な挙動をシミュレートすることが可能であることを示した。

といった成果が得られた。また、実際に提案したデバイスオントロジーに基づく設計支援システムを作成し、簡単な人工衛星の姿勢制御系のモデルを作成しその挙動をシミュレートすることで、本研究の提案手法が人工衛星のモデル記述においても有効であることを示した。

6.2 今後の課題

今後の課題としては、提案した記述方法自体の改良や設計支援ツールとしての改良、記述されたモデルの各種推論での利用が考えられる。

6.2.1 記述方法自体の改良

記述方法自体の改良としては、デバイス自身への作用の熱系などへの拡張や、重力などの場による力や6軸固定以外の拘束への対応、スクリプトとしてオントロジーの外に記述している挙動モデルのオントロジーへの組み込みなどが挙げられる。

6.2.2 設計支援ツールとしての改良

設計支援ツールとしても、作成したシステム全体を新たなデバイスクラスとして登録したり、サブデバイスの中に更にサブデバイスがあるようなシステムを作成したりすることへの対応などが挙げられる。

6.2.3 記述したモデルの利用

記述されたモデルの利用としては、本研究で作成した挙動シミュレータのような定量的な推論以外にも、従来研究として挙げた [関谷 99, 来村 02] の本来の主目的である「機能」に関する推論への利用や、システムの冗長性や並列性に関する推論、システムの故障解析などの定性的な推論における利用が挙げられる。また、KIEF [関谷 99] のように、デバイスの3次元形状の記述などに対応して3Dモデリングツールと連携させたり、MATLABなどの数学ツールと連携させたり、各種ツールの間での共有データ形式として用いることも考えられる。

参考文献

- [Borst 95] Borst, P., Akkermans, H., Pos, A., and Top, J.: The PhysSys Ontology for Physical Systems, in *Working Papers of the Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning*, pp. 11–21 (1995)
- [Horváth 98] Horváth, I., Vergeest, J. S., and Kuczogi, G.: Development and Application of Design Concept Ontologies for Contextual Conceptualization, in *Proc. of 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences DETC*, DETC98/CIE-5701 (1998)
- [Kleer 84] Kleer, de J. and Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 7–83 (1984)
- [関谷 99] 関谷 貴之, 吉岡 真治, 富山 哲男: オントロジーを用いた統合的設計支援環境の実現, *人工知能学会誌*, Vol. 14, No. 6, pp. 119–128 (1999)
- [溝口 05] 溝口 理一郎: オントロジー工学, オーム社 (2005)
- [溝口 12] 溝口 理一郎: オントロジー工学の理論と実践, オーム社 (2012)
- [茂原 02] 茂原 正道, 鳥山 芳夫: 衛星設計入門, 培風館 (2002)
- [来村 02] 来村 徳信, 溝口 理一郎: 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 (2002)
- [来村 04] 来村 徳信: 工学ドメインオントロジー, *人工知能学会誌*, Vol. 19, No. 2 (2004)
- [澤井 13] 澤井 裕一郎, 堀 浩一: 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, 2013年度人工知能学会全国大会 (第27回), pp. 311–1 (2013)