

人工衛星姿勢制御ソフトウェアの状態遷移表ベース設計事例

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 准教授

坂井 真一郎

1. はじめに

本稿では、現在取り組んでいる状態遷移表ベース設計手法を人工衛星開発に導入する試みについて紹介する。筆者は現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所で研究教育職に就いている。ここでは、宇宙科学およびその手段としての宇宙機・ロケット等の研究開発が行われており、小惑星への往復を果たした「はやぶさ」も当研究所で開発され打ち上げられた探査機のひとつである。我々は、衛星メーカーとタッグを組んで科学衛星や探査機を開発・運用し、一方では将来の宇宙機へ向けた新しい技術の基礎研究や実験を、時には学生たちも交えながら進める役割を担っている。

人工衛星の中でも、例えば通信衛星のような商業利用を目的としたものは、近年はメーカー毎の標準化も進み、大量生産に近い効率的な開発方式が採られるようになってきているようである。しかしながら、当研究所で開発されるのは、最先端の科学観測を行う、あるいは未踏の宇宙へ探査に赴くといった宇宙機が中心であり、

どうしても各ミッションに最適化した設計を採らざるを得ない。従って我々は、大規模化・複雑化が進みしかも一品生産品である宇宙機を、いかに効率的に開発するかという問題に直面している。

筆者自身の専門分野は制御工学であり、主に宇宙機の姿勢制御システムの開発に関わっている。宇宙開発は新技術の導入に時に慎重な分野であり、そのため姿勢制御則も当初はハードワイヤードロジックなどにより実装されることが多かった。ようやく 1980 年代からプロセッサを搭載してソフトウェアで制御を行う方式が導入されはじめ、現在ではほぼ全ての宇宙機でソフトウェアによる姿勢制御が行われるに至っている。

姿勢制御システムには、地上から送信された計画に従い観測装置が正しく観測対象に向く姿勢を実現する、姿勢を変更して次の観測対象へと向かう、異常を検出した場合には太陽電池パネルが十分電力を得られる安全な姿勢に待避する、といった多くの役割が求められ、その機能・性能への要求は高まる一方である。

このため姿勢制御ソフトウェアの規模も次第に大きくなっており、その開発にかかるコストや時間、複雑さの陰に潜む不具合の可能性などが看過できないものになりつつある。そしてここでも、求められる機能・性能が科学衛星・探査機毎に異なり、その度に新規設計が必要となる点が問題となってくる。

2005年に打ち上げられた70kg級小型科学衛星「れいめい」は、オーロラの科学観測と各種の工学技術実証を目的として当研究所でインハウス開発された人工衛星である。その姿勢制御ソフトウェアの設計・開発に際して、筆者らは一部に状態遷移表ベースの設計手法を導入しており、そして現在、その経験も踏まえ姿勢制御ソフトウェアなど人工衛星の設計開発に状態遷移表ベース設計ツールを導入する試みを進めている。本稿では以下、これらの話題について紹介していく。

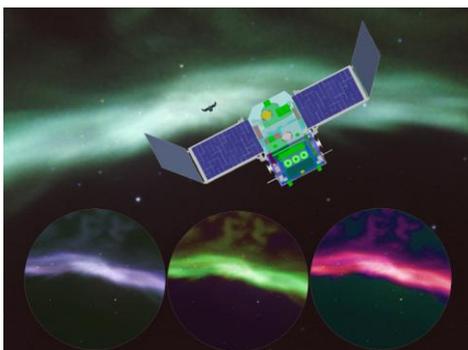
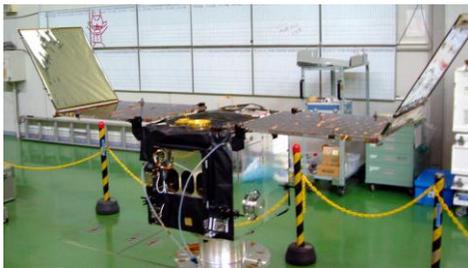


図1:オーロラ観測小型衛星「れいめい」(INDEX)

2. 姿勢制御ソフトウェアと状態遷移表ベース設計の親和性

宇宙開発は総合工学であり、設計開発の現場では多くの専門家達との議論が日々交わされている。そこでしばしば耳にするのが、「姿勢制御はどうも分かりにくい」という意見である。制御はダイナミクスという本質的に連続かつアナログな対象を扱っているため、その動作を記述したり挙動を仕様化したりしにくい点があるが、その「分かりにくさ」の原因のひとつではないかと筆者は考えている。例えば、衛星にあるコマンドを送った時、衛星で何が起こり、その結果としてどういう応答がテレメトリとして帰ってくるかという基本的なことさえ、その時の衛星の姿勢や角速度、モータの回転数等に依存してしまうため、一言で答えることが難しい。このようなダイナミクスを持ったアナログ量をいわば離散化・デジタル化して表現する方法として、状態遷移表表現はひとつのバランスのよい手段となり得る。上記の点も含めて、姿勢制御ソフトウェアと状態遷移表表現とは、以下の点で親和性を持っていると考えている。

1. 連続的なアナログ量であり、ダイナミクスによる時間変化を伴う対象の離散的表現としての可能性
2. 制御に用いる機器のなかには、内部状態を有するものがある点。
3. 姿勢制御として今何をしているのか、観測対象を指向しているのか安全な太陽指向姿勢維持を行っているのか、といったシステムレベルでの動作状態の表現に適している点

3. 「れいめい」衛星の開発における状態遷移表の活用

「れいめい」衛星の姿勢制御サブシステムでは、新たな試みとして、2つの階層で状態遷移表が導入されている。ひとつは、姿勢制御システムとして何をすべきか、という動作モードの管理である。異常時の待避姿勢であるスピン太陽指向状態、オーロラ観測時の姿勢である定常ポインティング状態、正常時の待機姿勢である定常太陽指向状態といった複数の状態が定義されており、地上からのコマンド指示や内部タイマ、あるいは異常検知などにより自律的に発生するイベントによって、これらの状態間を遷移するように状態遷移表が定義されている。

実際の姿勢制御は、センサやアクチュエータなど機器を管理する関数、姿勢制御誤差を算出する関数、誤差をゼロにするためのフィードバック制御演算を行う関数など、複数の関数を組み合わせて行われている。制御屋になじみのある表現をすれば図 2. のようなブロック図となるが、ここではこれら各ブロックを

“モジュール”と呼ぶことにする。前述の姿勢制御システム全体としての動作モードそれぞれに対して、各モジュールに与えるべき“動作指示値”が定義されている。そして各モジュールの内部には、この動作指示値やセンサ・アクチュエータの状態等で駆動される状態遷移表がそれぞれ実装されている。もちろん、各モジュールの状態遷移処理を行うコードは共通化されており、各モジュール毎には基本的には状態遷移表だけデータとして定義すればよく、つまりコードとデータは分離されている。

このような設計のメリットは大きく2つあると考えている。ひとつは、連続的に変化していく制御系の挙動を記述できるため仕様を人に伝えたり記録に残したりしやすい点である。もうひとつは、制御ソフトウェアがどう振る舞うはずか正解値を用意できるため、状態遷移部分のソフトウェア単体試験を自動化できる点である。我々は制御が専門であり、本来は姿勢制御則の設計やチューニングにこそ集中したい。ところが制御ソ

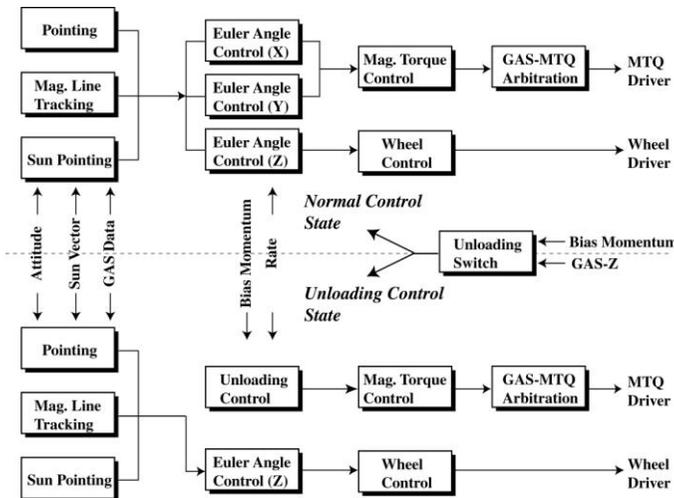


図 2. 「れいめい」衛星姿勢制御機能のある部分をブロック線図で示したもの。この各ブロックが、状態遷移表を内包する“モジュール”となっている。制御系全体の動作を管理する上位の状態遷移表に応じて、各モジュールに“動作指示値”が渡される。

ソフトウェア実装にあたっては、状態管理など狭い意味での制御則以外の部分の規模が、むしろ大きくなりがちである。これらの部分を状態遷移表という一種のテンプレート化することで、本来の制御則設計により集中できるというのが、「れいめい」衛星で状態遷移表ベース設計を試みた感想である。

また、仕様が記述できるといえるメリットも、最近になって改めて実感している。というのも、2005年に打ち上げられ以来順調にオーロラ観測を続けていた「れいめい」衛星だが、2011年になって姿勢センサの一部に故障が生じ、現在これに対応するべく搭載ソフトウェアの改修作業が行われている。既に6年前に実装されたソフトウェアの挙動だが、まずは状態遷移表を見ればその挙動を思い出せるのは大きなメリットである。また、必要なソフトウェア改修の一部は単に状態遷移表を書き換えるだけで済み、この点でもメリットを実感している。

このように「れいめい」衛星では状態遷移表ベース設計が試みられているが、当時は設計ツール類などは特に導入されなかった。そのために、例えば状態遷移動作の自動試験なども新たに試験用ソフトウェアを実装して行う必要があり、結局手間がかかったという点が反省点となっていた。その反省も踏まえて、状態遷移表ベース設計ツールである“ZIPC”が活用できないか、検討を始めたところである。2010年にはまず、「れいめい」衛星の姿勢制御系で実装された状

態遷移表をZIPCにより記述してその動作を再現できるか、という試みを行った。機器の時間的な状態変化に応じた状態遷移が再現できるか、また、上記のように階層的に接続された状態遷移表の挙動が再現できるか、といった点が主な評価の観点であったが、結果は概ね満足できるものであり、簡単な状態遷移をシミュレーションで再現させることができている。その結果は、2011年の組み込みシステム開発技術展(ESEC)でも展示されている。

4. 今後の活動目標

これまでの検討結果なども踏まえて、今後はたとえば宇宙機メーカーも交えた議論を行い、この分野での状態遷移表ベース設計手法の普及について検討していきたいと考えている。その際には、筆者自身の専門分野である姿勢制御以外にも、たとえば人工衛星試験の自動化といった別の可能性についても検討していきたいと考えている。宇宙分野も多く産業分野と同様、厳しい諸外国との競争にさらされている。そのためにも、このような活動によって一層タイムリーな衛星開発を実現し、今後も夢のある宇宙開発に挑戦し続けたいと考えている。

5. おわりに

この活動は当研究所の福田准教授、中谷開発員らと進めているものであるが、キヤッツ株式会社 穴田様にはZIPCの使い方から検討の方向性の議論に至るまで多大なご支援を頂いており、ここに心よりの謝辞を述べさせていただきます。