

「どこでも運用システム」の開発状況(第二報)

永松 弘行^{*1}

Development of Anywhere Satellite Operation System (2)

Hiroyuki Nagamatsu^{*1}

Abstract

We are in progress to develop a system for automatic operation of a satellite in order to reduce human load at satellite steady operation phase. The ground station for small satellite REIMEI is used as a test bench for verification of the proposed method. The automatic operation system is nearly completed for downlink operations of the data recorder that account for 80% of REIMEI steady operation. This approach is very effective to reduce psychological and physical load of operators. To extend or complement functions of automatic operation system, we are also in progress to develop a system for remote operation of satellite as an web-based application which is portable to various devices, for example, tablet, smart phone and personal computers. With this remote operation system, operators can monitor status of satellite and ground station anywhere. In addition, on receiving emergency call, operator can send appropriate commands or operation plans by controlling automatic operation system.

Keywords: Anywhere Operation System, Automatic Operation, Remote Operation, Web-bases Application

概要

衛星の定常運用における運用人員(オペレータ)の負担軽減を主目的とする衛星自動運用システムを開発中である。「れいめい」衛星の運用局(相模原局)を実験ケースとして試験運用を継続しており、実用化の目処は立った。また、自動運用システムを補完、あるいは拡張するための遠隔運用システムをあわせて開発中であり、「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム(どこでも運用システム)」の構築を目指している。携帯端末上にて試作した遠隔運用システムの汎用性向上のための改修を施し、Web アプリケーションとしての整備を進めている。本稿では、「どこでも運用システム」の開発状況を紹介する。

1. はじめに

宇宙機(衛星や探査機)を打ち上げる目的は様々だが、ミッション期間中に高品質の観測データを安定して提供し続けるための、また、宇宙機の状態を監視し、観測インフラとしての宇宙機の維持管理をするための運用システムの整備が、オペレータの確保も含めて肝心である。しかしながら、運用システムを維持するためのこれら要素は、宇宙機の開発においては後回しにされがちであり、運用システムの整備維持が不十分、オペレータの確保が不十分、運用人員の負担増、運用コストは削減傾向にある、などの問題がある。定常運用の負担軽減、効率化、コスト削減のための現実的な方策が求められると考える。運用システムを可能な限り自動化してオペレータの負荷を軽減する方法がいくつか提案され、また、実施している例、機関もある^{1), 2), 3)}。

筆者らはこれまで、特に地球周回衛星の定常運用におけるオペレータの負担軽減を主目的に、ISAS/JAXAが開発した小型科学衛星「れいめい」の地上局(相模原局)⁴⁾をテストベッドとした衛星自動運用システム⁵⁾

^{*1} 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用センター 衛星運用グループ
(Satellite Operation Group, Center for Science-satellite Operation and Data Archive, Institute of Space and Astronautical Science)

の開発を行ってきた。このシステムは衛星管制システムとは独立に整備可能なシステムで、ユーザの要求に応じて機能拡張可能なように設計されている。また、「れいめい」衛星による、観測データ/HKデータのダウンリンク運用のほぼすべてを自動運用システムで行うという実績を積んでおり、自動運用システム導入の効果は大きい。さらに、緊急時対策や遠隔地からの衛星状態監視など、自動運用システムの機能を補完あるいは拡張するための遠隔運用システムを携帯端末上に試作した⁶⁾。遠隔運用システムは、1)衛星運用の操作一式(運用時間調整、運用、取得データ管理、安全管理)を、場所を選ばず実現し、2)自動運用システムと組み合わせ、「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム」(以下、「どこでも運用システム」と呼ぶ)を実現することで、最終的には「**衛星運用における人間の負担を極力削減し、人間は人間にしかできない作業に集中できる環境を提供することで、低コストで効率的な運用を実現する環境**」の整備を目指している。また、自動運用システムの開発に用いている簡易シミュレータ⁶⁾もあわせて、運用を意識した衛星開発(逆に衛星開発を意識した運用システム開発)が可能なシステムを実現することも、「どこでも運用システム」の一つの大きな目標である。

試作した遠隔運用システムは「どこでも運用システム」の実現に近づくものではあったが、端末の開発環境(具体的には iPad/Xcode)に依存するため汎用性に欠け、使い勝手もやや癖があるものであった。そこで、端末の機種依存性を極力なくす(汎用性を高める)方向でシステムの改良を行った。

本稿の構成は、以下の通りである。第2章で、「どこでも運用システム」の概要を述べる。第3章で、「どこでも運用システム」のコアシステムの一つ、遠隔運用システムの汎用性向上を目指した Web ベースのアプリケーションの開発手順について述べる。第4章で開発中のシステムに関する考察を行う。第5章で今後の課題を示し、本稿をまとめる。

2. 「どこでも運用システム」の概要

「どこでも運用システム」の概要を、図1に示す。

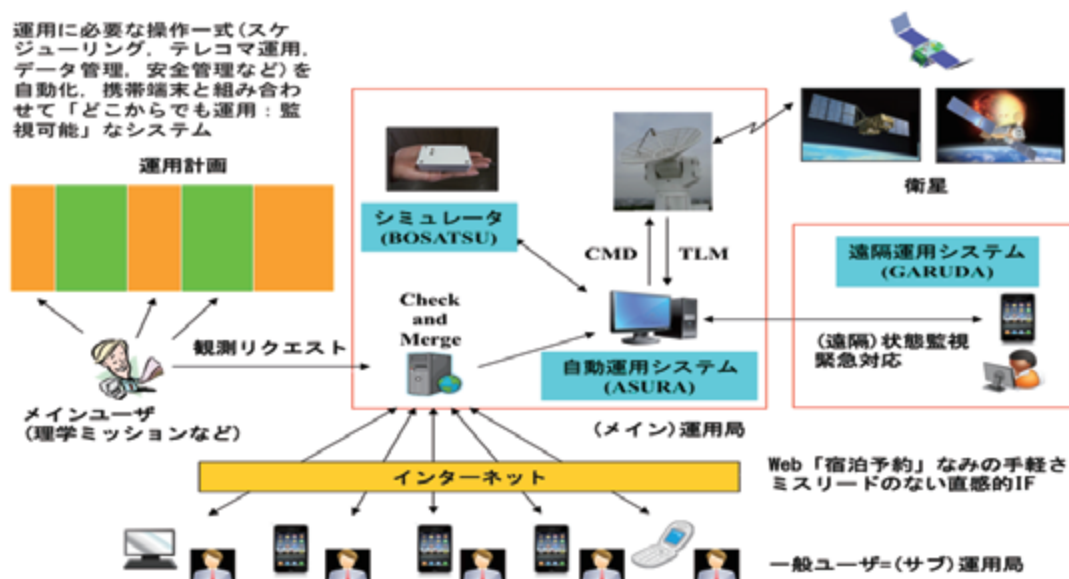


図1 「どこでも運用システム」の概要

「どこでも運用システム」は、オペレータが行うべき操作をソフトウェアにより自動化し、さらに自動化したシステムを遠隔地から Web 宿泊予約並の手軽さとわかりやすいインタフェースで衛星や地上局の監視および制御することで、運用の質を維持したまま人間の負担を軽減、人間が人間にしかできない作業に集中できるシステムの実現を目指している。これら機能の実現を目指し、「どこでも運用システム」は、以下の三つのコア・サブシステムより構成される。本論文では、2)の衛星遠隔運用システム GARUDA の汎用性向上のための改良を実施したが、本章では各サブシステムの概略を述べる。

- 1) 衛星自動運用システム ASURA (Adaptable Scheduler for Ubiquitous and Rational Application)
- 2) 衛星遠隔運用システム GARUDA (Generic Attachment for Reviewers' Utility and Data Archives)
- 3) 簡易シミュレータ BOSATSU (Basis Of Simulator Architecture for Total Satellite Utility)

衛星自動運用システム ASURA は、可視時間中のアンテナ制御やコマンド送信、衛星や地上局の状態監視などの運用シーケンス全体をオペレータの代わりに管理・統括・制御することで、(ほぼ無人の)運用システムを実現するサブシステムである⁵⁾。図2が、ASURA の典型的な動作シーケンスである。ASURA の機能確認のため、「れいめい」実機および相模原局を用いての自動運用試験を、2010 年末より継続している(試験回数は2014 年6 月末現在、500 回以上)。「れいめい」運用においては、観測データ/HK データのダウンリンク運用が定常運用の約8 割を占め、このほぼすべてを自動運用システムにより実施している。

自動運用システムの導入によってオペレータの負担が軽減される。オペレータが衛星や地上局の状態を監視したり、場合によっては緊急時の対応をせざるを得なかったり(セーフホールド状態からの復帰、緊急コマンド送信、災害対策など)、というケースに自動運用システムとしてどのように対応するかを検討・実装しておく必要がある。人間が極力運用システムに(時間的にも空間的にも)拘束されないための一手段として、図3に示すサーバ・クライアントモデルに基づく衛星遠隔運用システム GARUDA を開発した。GARUDA は ssh ポートフォワーディングによって任意の遠隔地から ASURA の監視および制御が可能であり、ASURA と連携することで「どこからでも衛星が運用・監視可能な」システムを実現している⁶⁾。

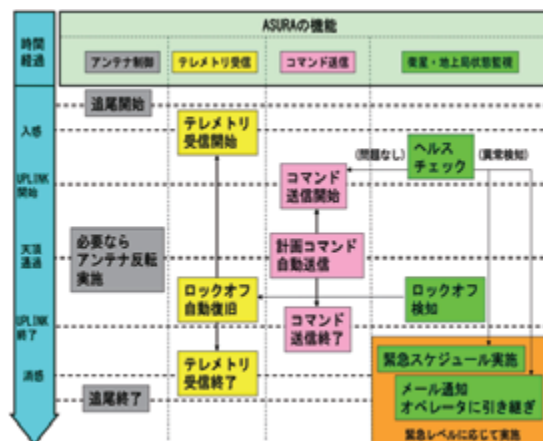


図2 ASURA による自動運用シーケンス

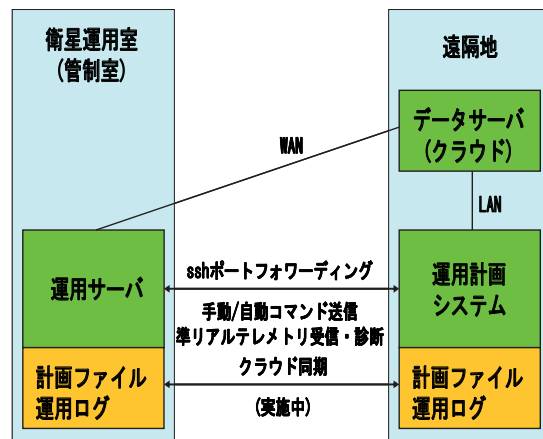


図3 GARUDA のサーバ・クライアント構造

簡易シミュレータ BOSATSU は、ASURA に組み込むアルゴリズムの検証用治具として開発した⁷⁾。当初検証に用いた相模原局・試験運用システム(「れいめい」搭載計算機のプロトモデルを利用)の出力信号は、信号の欠損がない、出力信号は一定パターンに限られるなど、試験信号として期待するものとは限らず、

例えばアンテナ受信レベルの変動に信号の欠損なく追従するためのアルゴリズム、衛星状態に問題がある場合に適切なコマンド処理を施すためのアルゴリズム、などの検証が十分とはいえないため、衛星実機および地上局の挙動に近い(擬似)信号パターンを容易に生成できるシステムとして BOSATSU を開発した⁴⁾。BOSATSU には衛星を模擬する BOSATSU-SAT と地上局を模擬する BOSATSU-GSE があり、BOSATSU を用いることで、図 4 に示すような衛星・地上局を含む閉ループ試験システムを比較的容易かつコンパクトに構築できる。ASURA は自動的に連続して複数の運用シナリオを走らせることができるため、その検証がより確実かつ容易になる。BOSATSU は、図 4 中の XML 形式で記述される衛星データベース(SATbase.xml)および地上局データベース(GSEbase.xml)を書き換えることで他衛星・地上局へ適用可能な汎用性を確保している。これらデータベースは、ASURA/GARUDA でも読み込んでそれぞれの動作を決定するものであり、3 つのサブシステムで共通的に利用する。

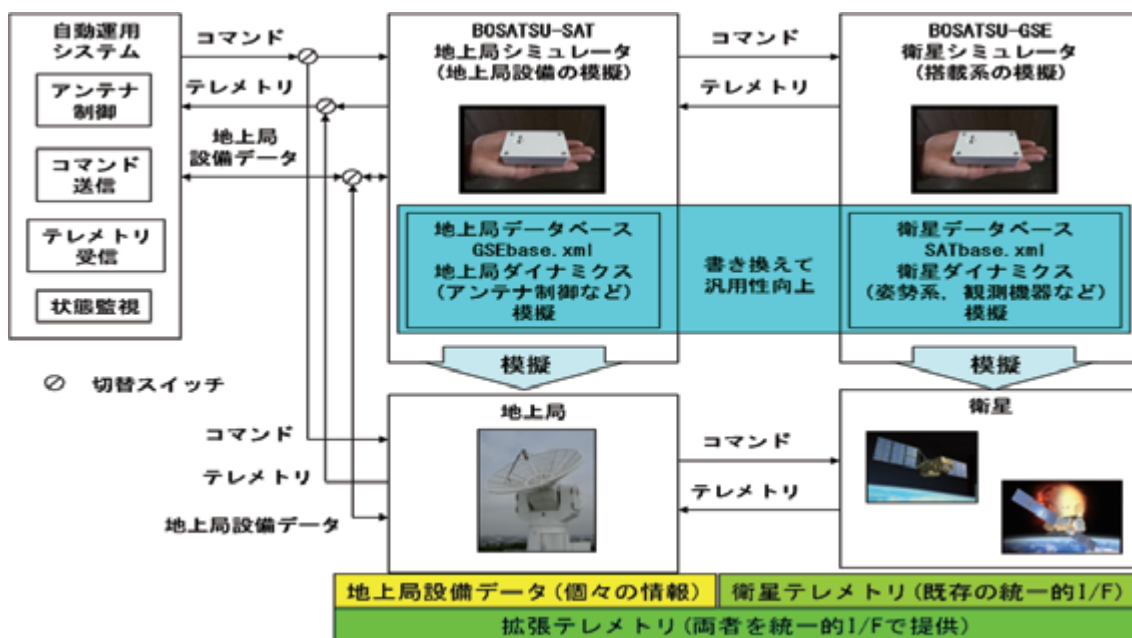


図 4 簡易衛星シミュレータ (BOSATSU) を用いた閉ループ試験システム

3. 遠隔運用システム GARUDA の汎用性向上への試み

遠隔運用システムの開発にあたり、近年急速に普及している iPad に代表されるタブレット端末やスマートフォンに着目した。これらは安価であり、場所を選ばずに(無線環境があればどこでも)情報のやりとりが可能である。必要なときに即座に取り出して使え、不要になったらしまえるなど、使い勝手がよい。開発環境もタブレット自体のシミュレータがある。煩雑になりがちな配線も大幅に削減可能で、また、消費電力も低く抑えられる。用途を絞れば、低コストで使い勝手のよいシステムが構築できる。

セキュリティ確保や通信回線(必要な帯域の確保)の問題などから、まず、衛星や地上局の状態監視を行うシステム(衛星・地上局の情報を受信するだけの受動的なシステム)を、iOS 端末 (iPad/iPhone) 専用の開発環境である Xcode を用いて開発した。iPad 版衛星状態監視システムは、「れいめい」の衛星状態監視機能の一部を実装している。「れいめい」運用システムの LAN に設置した無線アクセスポイント (Wi-Fi) 経由

で衛星・地上局の情報を取得し、有効距離は 10m 弱ではあるが、2012 年 8 月より、「れいめい」定常運用において、従来運用システムの衛星状態監視の補完システムとして利用している。

Xcode は前述の通り、iOS 端末(iPad/iPhone)専用の開発環境である。優れたユーザインタフェースを提供する一方、開発したアプリケーションの動作機種は iOS 端末のみとなるため、汎用性に欠ける。より一般的には、iOS 端末も含め、これ以外の例えば Android 端末や汎用 PC など、複数種類の端末で衛星運用システムを構成するのが望ましい。したがって、対応機種の拡大を考える必要がある。

「どこでも運用システム」のサブシステム ASURA/GARUDA は、第 2 章で述べたように衛星や地上局の特性を記述するデータベースを持っている。データベースには、例えば衛星バス機器や地上局設備の名称、工学値変換のための数式、監視のためのリミット値などが記述されている。このデータベースは、第 2 章で述べたように「どこでも運用システム」の各サブシステムにおいて共通の情報源として機能する。対応機種の拡大、アプリケーション開発におけるデータベースのより効率的な活用を可能とするため、データベースから衛星・地上局の状態監視ならびに制御(コマンド送信)を行えるアプリケーションを(半)自動生成する仕組み(スクリプト)を開発した。この仕組みを用いてアプリケーションを生成する具体的な手順は、以下の通りである。

[アプリケーションの(半)自動生成手順]

- (1) 衛星データベースを作成する(XML 形式で記述)。
- (2) スクリプトを用いて、JavaScript/HTML のアプリケーション・コードを、自動生成する。
- (3) 生成したアプリケーションは、そのまま Safari/Firefox などの Web ブラウザ上動作する。
- (4) 表示など、ユーザの好みに応じてカスタマイズする((1)の手順に戻る)。

この手順により生成したアプリケーションは、Web ブラウザがあれば端末や OS の種類に依存せずに利用可能であり、携帯端末(iPad)上に実装した試作版に比べて、より汎用性の高いものとなっている。iPad 版の特長(場所を選ばない、省電力、省スペースなど)はそのまま、アプリケーション開発の労力が軽減される点がメリットとなる。今回開発した手順を用いると、iPad 版衛星状態監視システムと同等の機能を有する Web 版衛星状態監視システムを作成するには、[アプリケーションの(半)自動生成手順](1)に従って衛星データベースを作成した後は、手順(2)に従ってスクリプトを一度起動するだけでよく、JavaScript/HTML によるアプリケーションのコーディング時間は、ほぼゼロとなる。また、従来版(Xcode 版)は、端末の種類別に解像度やサイズに最適化した GUI を設計し直す必要があるが、改良版(Web 版)ではその必要はない。一度コードを生成すれば、端末の種類や OS に依存せず、衛星状態監視および衛星・地上局のコマンド制御が可能となる。

Web 版衛星状態監視システムは、2013 年 10 月より、相模原局にて実運用試験(一部項目はシミュレータを併用)を実施している。試験運用のシステム構成を図 6 に、条件を表 1 に、それぞれ示す。図 6 に示すシステムは、図 1 の赤線で囲んだ部分を模擬するものである。自動運用システム ASURA は、あらかじめ決められた運用計画(HK モニタ運用および DR データ再生)にしたがい、オペレータに代わって運用を実施する。安全性の確保、法律の関係からオペレータは ASURA の目の前に座っているが、基本的には「運用の様子を見ているだけ」である。衛星あるいは地上局トラブルの場合は、図 2 の右下に記述した手順が起動し、オペレータに運用を引き継ぐ。衛星、地上局のステータスおよび ASURA のステータスは、有線あるいは無線

LAN(Wi-Fi)を介して GARUDA に配信され(図 5 では有線 LAN は省略), オペレータ以外の人間にもチェック可能である. 図 5 の右側に表示されているのが, Web ブラウザ Safari 上で稼働する GARUDA のスクリーンショットである.

このシステムを用いて,「れいめい」の HK モニタ運用および DR データ再生運用において, 衛星の機器ステータス(バス電圧やバッテリー温度など)や地上局の機器ステータス(パワアンプの ON/OFF 状態やアンテナの AZ/EL 角度など)が問題なく表示されることを確認した. 無線 LAN のみを用いたシステムについては, iPad 版衛星状態監視システムを用いた試験運用を実施しているが, 今回は Web 版をいくつかの端末環境に実装し, 動作に問題がないことを確認した. 具体的に動作を確認した環境は, iPad 上の Safari に加えて(Wi-Fi 接続のみ), Macintosh/Windows 上で稼働する Safari/Firefox である(Wi-Fi/有線).

Web 版衛星状態監視システムは, iPad 版と同じくコマンド送信機能を有するが, 特にセキュリティ面の制約を考慮し, 実運用においては状態監視機能の確認に止め, コマンド送信機能の確認は,「れいめい」衛星の搭載計算機を利用した試験装置(「れいめい」搭載計算機プロトタイプを用いたハードウェアシミュレータ)を対象として実施しており, 原理的に可能なことは確認済みである.

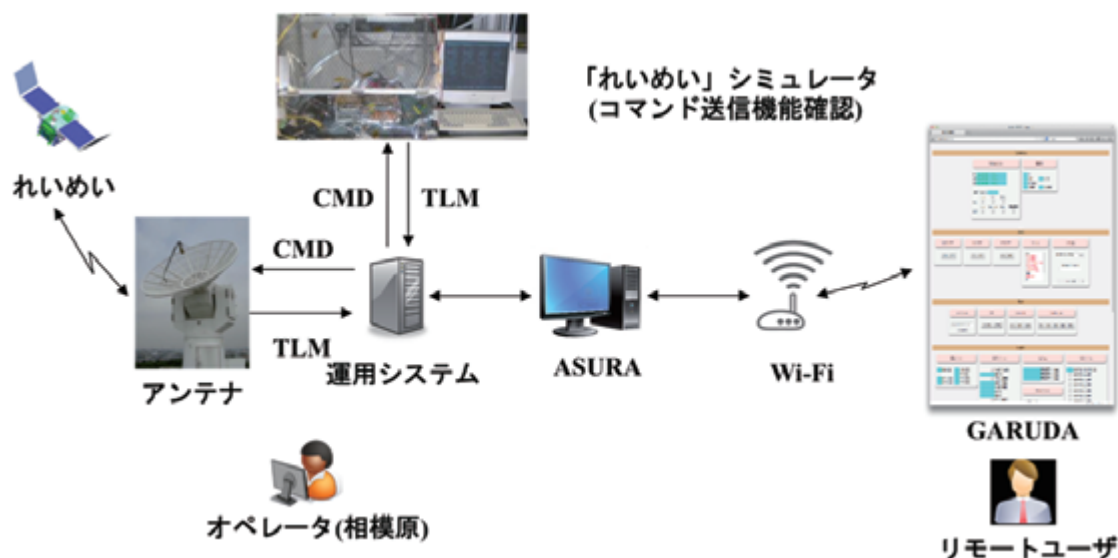


図 5 相模原局における GARUDA 試験運用システムの構成

表 1 相模原局における GARUDA 試験運用時の条件

項目	項目名 / 条件
アプリケーション	衛星状態監視システム
ネット接続環境	「れいめい」運用室内設置の有線 LAN および Wi-Fi ルータ GARUDA - ASURA - 運用システム - 衛星/シミュレータ
テレメトリ受信レート	8 kbps ~ 128 kbps (8/16/32/64/128 の 5 段階で可変)
コマンド送信レート	1 kbps (ハードウェアシミュレータを対象)

4. 考察

今回開発したアプリケーション生成手順を用いると、衛星データベース、地上局データベースから必要なアプリケーションが(半)自動生成されるため、アプリケーション開発の労力軽減、容易な維持管理、コスト削減が期待される。例えば GUI に相当する部分は、Web ブラウザの標準機能を用いる限りは開発の必要がなくなる。すなわち、GUI 部コーディングの時間はほぼゼロになる。また、コーディングがほぼ不要となるため、コードの維持管理もほぼ不要となる。開発者は衛星データベース、地上局データベースという、運用システムのより根幹的な部分の構築作業、維持管理作業に集中すればよい。これは、「どこでも運用システム」が目指す「人間は人間にしかできない作業に集中できる環境を提供する」ことに繋がる。

また、今回開発したアプリケーション生成手順を用いると、衛星・地上局の開発初期段階から試験治具として使えるアプリケーションを揃えられる。このアプリケーションを用いると、データベース中に記述される衛星・地上局のステータスを即座に確認できるし、コマンド送信も可能である。衛星の開発において、試験は重要な位置を占める。試験の際に、データ入出力のための適切な治具が準備されていることは重要であるが、地上運用設備(衛星管制システム)に近い完成度を持つ治具の整備を、搭載側の開発と平行して進めることには非常な労力を要する。しかし、開発の早期段階から運用に用いる衛星管制システムに近い完成度を持つシステムを導入できるなら、試験の労力が大幅に削減できる可能性は高い。

第 1 章で触れたように、運用システムの開発は、衛星の開発に比べると後回しにされがちであり、衛星の開発の目処が立ってから地上局の整備を行う場合が多いと考えられる。衛星の運用において重要な機能が衛星開発の初期段階から見えやすい環境が整備できていれば、より効率的な運用システムの開発に繋がることが期待できる。本論文で提案する手法は、このことに対する一つの回答と考える。つまり、開発の早期段階から衛星と地上システムそれぞれの開発者が、実機や実設備を使うリスクを軽減しつつ、双方のイメージを把握し、同時並行的開発・開発の同時最適化に寄与することが期待できる。衛星を打ち上げる目的は様々だが、搭載系の自律機能を除けば、打ち上げ後の衛星の維持管理は地上局を介して行うしかなく、搭載系の能力を十分発揮できるか否か、無理のない運用が可能かどうか、は、地上の運用システムの完成度に大きく左右される。したがって、開発の早期段階から衛星と地上局の同時並行的な開発を行うことの重要性を、ここで改めて強調する。

また、本論文で提案する手法は、特に小規模・少人数の衛星プロジェクトにおいては、アプリケーション開発に割くリソースを抑えつつ、効率的な開発体制を整えるために威力を発揮すると考えている。

5. まとめ

時と場所を選ばず「どこからでも衛星が運用・監視可能なシステム」すなわち「どこでも運用システム」の開発状況について述べた。「どこでも運用システム」のコアとなるサブシステムの一つが、衛星自動運用システムの機能を補完あるいは拡張するための遠隔運用システムである。本論文では、「どこでも運用システム」の実現を目指すシステム開発の一環として、コアとなるサブシステムの一つ、遠隔運用システムの汎用化を提案し、システム構築の現状および実運用試験について報告した。

具体的には、「どこでも運用システム」で共通的に使われる衛星データベース、地上局データベースから遠隔運用システム上で稼働する Web ベースのアプリケーションを”直接”自動生成する手順を開発した。

また、開発した自動生成手順により生成したアプリケーションをいくつかの端末上(異なる OS/Web ブラウザ、および有線端末と無線端末)で、相模原局における「れいめい」定常運用にて動作させることで、汎用化が実現できたことを確認した。

今後も、システム機能の充実を図りつつ、「れいめい」衛星ならびに相模原局以外の衛星および地上局へと適用範囲を広げてゆきたいと考えている。相模原局自体も、引き続き自動運用・遠隔運用システムの試験環境として有効活用してゆく。また、特に大学衛星をはじめとするピギーバック衛星向けに、自動運用・遠隔運用を前提とする運用システムを、ハードウェアを含めて提供できるよう、「れいめい」に依存する要素を無くする形で構築中である。

謝辞

日頃からご指導ご鞭撻頂いております、「れいめい」開発メンバ、運用メンバの皆様、自動運用システムのソフトウェア開発でお世話になっております秋丸忠隆氏に、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) J.ean-Marc Soula: “Automation of CNES Ground Station Networks”, 8th International Workshop on RCSGSO, Automation No.3, Tsukuba, Japan, 2009.
- 2) D.Chung et.al.: “Concept Design of the Generic Mission Operation System”, 8th International Workshop on RCSGSO, Automation No.12, Tsukuba, Japan, 2009.
- 3) J.Jackson et.al.: “NASA's Ground Network's Right Sizing and Transition to Outsourcing” , 8th International Workshop on RCSGSO, Outsourcing No.5, Tsukuba, Japan, 2009.
- 4) H. Saito et.al. : “An overview and initial in-orbit status of “INDEX”satellite”, 56th International Astronautical Congress, IAC-05-B5.6.B.05, Fukuoka, Japan, Oct. 2005.
- 5) H. Nagamatsu and H. Saito : “Development of Automatic Operation System-Using REIMEI Ground Station as a Test Bench”, 62nd International Astronautical Congress, IAC-11-B4.3.4, Cape Town, South Africa, Oct. 2011.
- 6) 永松 : どこでも運用システムの開発, 第 57 回宇科連, JSASS-2013-4572, 2013.
- 7) 永松 : 簡易衛星シミュレータの開発, 第 55 回宇科連, JSASS-2011-4278, 2011.