

2E16 東京工業大学 CUTE-I 運用地上局システムの開発と運用

○宮下直己, 中谷幸司, 宇井恭一, 居相政史, 占部智之, 尾曲邦之
松永三郎 (東工大・理工)

Development of Ground Station System for CUTE-I and CUTE-I Ground Operation
Naoki Miyashita, Koji Nakaya, Kyoichi Ui, Masafumi Iai, Tomoyuki Urabe, Kuniyuki Omagari
Saburo Matunaga (Tokyo Institute of Technology)

Key Words: CUTE-I, CubeSat, Ground Station, Amateur Radio, Internet, XML

Abstract

Universities and space agencies of the world have been developing the small satellites in recent years. We Tokyo Institute of Technology, Laboratory for the Space Systems (LSS) also developed 10 cm cubic-shaped small satellite "CUTE-I" since 1999. On 30th June, 2003, we threw CUTE-I into the orbit using the Russian rocket "ROCKOT". CUTE-I has been active on orbit from the launch date to now and executing its missions and experiments. Simultaneously we have developed the ground station system for CUTE-I ground operation. This ground station system is developed by the latest Internet technology, Extensible Markup Language (XML) technology, and Open Source Systems. By adopting these technologies, this system is superior to system extensibility, data processing and data exhibiting, and low-cost. By using this system, we can read the satellite telemetry, satellite orbital information, orbital map, and so on using general web browser, cellular phone, and Personal Digital Assistant (PDA). Furthermore, we considered about small group operation in order to decrease the human resources. In this paper, we describe development of the Internet and XML-based ground station system and the CUTE-I ground operation.

1. 緒言

近年, 世界中の大学や宇宙機関が, 小型衛星を開発し軌道に投入されている. 本研究室では, 1999 年度より, 10cm 立方の超小型衛星 CUTE-I を開発し, 2003 年 6 月 30 日にロシアより打ち上げた. CUTE-I は, 打ち上げ後順調に動作し続け, 様々な実験やミッションを行っている. 本研究では, CUTE-I を運用する地上局システムの開発をおこなった. 本システムは, インターネット技術, XML データ技術, オープンソース開発を多用することにより, システムの拡張性, データの処理性, 公開性に優れた低コストのシステムである. 本システムを利用することで, 衛星からのテレメトリデータ, 衛星軌道情報などを一般のウェブブラウザや携帯電話などで閲覧することが可能である. 更に, 運用を行う際, 省人員化などの工夫を施している. 本稿では, 東工大地上局システムと CUTE-I の運用について紹介する.

2. CUTE-I 地上局システムの開発

2. 1 ハードウェアの構築

CUTE-I は, 144MHz, 430MHz のアマチュア無線帯を利用している. その為, 東工大に構築した地上局システムも主に一般的なアマチュア無線機器によって構成されている. CUTE-I は, ビーコンとして CW (モールス信号) を常時ダウンリンクしている. CUTE-I 打ち上げ以前では, CUTE-I の正確な軌道を

得ることが難しいという予想から, 指向性の強い八木アンテナだけでなく, 無指向性のヘリカルアンテナを用意し, 全天に対してトラッキングを行う予定であった. 実際の運用では, ロシアのロケット側からある程度正確な軌道情報を取得することができ, 打ち上げ直後から運用を行うことができた. また, 米国の NORAD による追跡軌道情報(TLE 形式)も公開されており, 現在はそれをもとに運用を行っている. 本研究室が位置する建物の屋上に, クロス八木アンテナおよび無指向のヘリカルアンテナを設置し, 研究室内に無線機, 制御 PC などを設置した(図 1).



Fig. 1 Ground Station System

2. 2 ソフトウェアの開発

後節で述べる地上局システムを開発する前に, CUTE-I を最低限運用するためのソフトウェアを開発した.

- ・ 軌道計算機能：アンテナ方向角，ドップラ周波数などの算出
- ・ ハードウェア制御：アンテナ方向制御，無線機周波数制御など
- ・ テレメトリデータ解析：ビーコンおよび FM パケットテレメトリの受信および解析など
- ・ コマンド生成：アップリンクコマンドの生成および送信

以上の機能を実装し，CUTE-I 打ち上げ以前に，他のアマチュア無線衛星に対して運用を行い，軌道計算や，アンテナ，無線機などの機器制御を正常に機能することを確認した．開発した地上局システムには，以下に示す問題点が発生した．

- ・ 全機能を 1 つのソフトウェアに集中して実装したため，開発効率が悪く，また大規模な地上局システムではシステムの変更が困難．
- ・ CUTE-I に特化した独自の解析系，データ形式を採用しているため，他の衛星への対応が困難．
- ・ 人工衛星から取得した有用なデータを，広く公開する為には，データ公開部の開発が必要．

これらの問題点は，CUTE-I 用の小規模な地上局システム特有の問題ではなく，宇宙機関が所有するような大規模な地上局システムを含め共通の問題点である．

3. 従来の地上局システム

従来，人工衛星を運用する地上局システムは，運用する衛星に特化して開発されることが多かった．例えば，宇宙開発事業団が開発した技術試験衛星 7 型の運用地上局も，衛星に特化した仕様で開発され，運用終了後解体している．このような開発は，経済面，開発効率，および開発期間などの面から問題がある．一方で，衛星には独自のミッションがあり，地上局の仕様も当然異なってくる．そのような中で，衛星の軌道情報，姿勢情報など，衛星に関わらず共通な部分は多数存在する．本研究では，まずこの共通部の基盤を作り，衛星に特有の仕様は，最小限のシステム変更で実装できる拡張性を考慮したシステムを提案する．更に，従来のシステムでは，衛星のテレメトリデータ，地上局の運用データなども，独自の仕様，フォーマットで管理されている．本研究では，地上局で扱うデータを全て XML(Extensible Markup Language)と呼ばれるデータ形式を用いて統一的に管理する．XML を用いることで，データの処理性，再利用性，公開性などが向上する．現在，宇宙開発における様々な情報を一般の人々が目にすることは少ない．本システムでは，衛星の軌道情報やテレメトリデータを広く一般の人々にも公開できる仕組みも提案する．

4. 新地上局システムの提案と開発

4. 1 多層型ウェブアプリケーションサーバ地上局システムの提案

地上局のシステムは 4 つの機能に分類できる．

- ・ デバイス制御機能：アンテナ制御，無線機制御，デコーダ，エンコーダなどの機器制御

- ・ ロジック計算：軌道計算，軌道推定，テレメトリデータの解析，コマンドの生成などの計算
- ・ データの貯蓄，管理：人工衛星のテレメトリデータ，ハードウェアの制御履歴データなどの保存，管理
- ・ 地上局オペレーション：地上局システムの運用，人工衛星ミッションの遂行，テレメトリデータを閲覧し衛星状態把握，コマンド送信指令など

上記の 4 つの機能は，地上局システムの規模によらず共通のものである．東工大地上局では，上記の 4 つの機能を 4 つの層に明確に分離・管理する多層型アプリケーションサーバシステムを提案し開発を行った．

A) デバイス層

地上局のアンテナ，無線機などのデバイスを直接制御する層である．各デバイスは，仕様も様々であり，シリアル通信などのレガシー通信方式を採用しているものが多い．レガシー通信方式は，通信速度が遅く，また通信配線などを延長する手段が少ないことが多い．デバイス層では，デバイス固有の仕様やレガシー通信部をラッピングし，抽象化したインターフェイスを他層に提供する．この抽象化インターフェイスを採用することで，デバイスが変更になっても，他の層に変更の影響を与えることを抑える．

B) ロジック層

ロジック層では，軌道計算，軌道推定，姿勢決定，コマンド生成，テレメトリデータの解析などの様々なロジックを実装する．本システムでは，軌道計算として，NORAD SGP,SDP アルゴリズムロジックを開発した．更に CUTE-I 用のテレメトリ解析ロジック部も開発した．ロジック層では，これらのロジックを用いてデバイス層から受け取ったテレメトリデータを解析する．テレメトリ解析ロジックは，衛星によって独自の仕様であるため，ロジック層は，各衛星の解析ロジックを容易に実装できる枠組みを提供する．一方で，軌道計算ロジックなどは人工衛星に共通のものであり，この部分は今後開発する必要はない．ロジック層は，ソフトウェアを完全にコンポーネントベースで開発することで，あらゆる衛星に対応できる．

C) データストア層

デバイス制御履歴データ，テレメトリデータの解析前後のデータ，軌道情報などのデータを統一的に保管，管理する．東工大地上局では，NORAD が公開している全衛星の軌道情報(TLE)を保持し，常に最新の軌道情報管理している．管理しているデータ形式

は、後述する XML 形式を採用しており、データの処理性、検索性、公開性に優れ、特定の衛星に依存しない形式で管理することが可能である。

D) ユーザ層

ユーザ層は、地上局システムを実際に制御するオペレータおよび、衛星のテレメトリデータなどを閲覧する一般の人々も想定した層である。東工大地上局の管制は、デバイス制御、軌道計算、テレメトリデータなどは、全てウェブブラウザを通して行うことができる。データストア層で管理されているデータを、ロジック層が問い合わせをし、ウェブブラウザで閲覧できる形式に動的に変形して公開することが可能である。ウェブ形式であるため、一般のオペレーティングシステムに付属のウェブブラウザだけでなく、携帯電話および PDA (Personal Digital Assistant)によるアクセスも可能である。

ユーザ層を特別なソフトウェアを必要とすることなく、ウェブブラウザで実現しているため以下のような利点がある。

- ・ ユーザ層でのソフトウェア開発・実装コストがなくなる。
- ・ ユーザ層の画面インターフェイスなどはロジック層が動的に生成するため、システム変更などが起こってもユーザ層には影響を受けない。つまり、ユーザ層は常に同じソフトウェアで様々な衛星を運用することができる。
- ・ ユーザ層がウェブブラウザであるため、有用な衛星の取得データや軌道計算などを、一般の人が用意に閲覧可能であり、宇宙開発のリアルタイムの情報を広く公開することが可能である。

上記のように4つ層を明確に分離し、分散管理・開発することで、デバイスの変更や、解析ロジックなどのシステム変更要求に対しても、他層に影響しない最小限の範囲で拡張することが可能である。本研究では、このような多層型システムをウェブベースで制御するため、多層型ウェブアプリケーションサーバシステムと呼んでいる。

4. 2 層間のネットワークシステム

前節で述べた層状に分離するシステムを構築する際、層間の通信ネットワークに関して以下の項目に対して検討を行った。

- ・ 通信コストを抑える
- ・ 高速データ通信
- ・ デバイス制御命令・コマンドアップリンクデー

タなどが扱われるためセキュリティ性の確保

- ・ システム変更柔軟に対応できるデータ形式

本地上局システムでは、通信コスト面、最新のネットワーク技術による通信速度の増加などから、IP ネットワークを層間通信に採用している。また、インターネットを用いることにより、アンテナなどのデバイス制御層とユーザ層が、地理的に離れた位置に存在していてもシステムを構築することが可能である。従来のシステムでは、この部分に専用線などを用いる事が多く、低速度通信、通信コストなどの問題があった。専用線は、外部よりアクセスが不可能であるため、IP ネットワークに比べセキュリティ性を容易に確保することが可能である。この問題に関して、本地上局システムは、後述する様々なセキュリティ確保技術を用いてセキュア通信を確保している。

また、実際に流れるデータに関して、拡張性や処理性などを確保するために XML と呼ばれるデータ形式を採用している。以上の点から、本地上局システムでは、層間に IP ネットワークを用い、データ形式として XML を採用した通信ネットワークを採用している。

4. 3 XML データの管理

本地上局システムで扱うデータは全て XML 形式で管理する。XML は、ある値に対して、その値とその値が表す意味を同時に保持するメタデータである。例えば、仰角が 30.3 度というデータは、XML では、以下のようにタグで囲う形で扱われる。

```
<Azimuth unit="Degree">30.3</Azimuth>
```

XML を採用することで、以下の利点がある

- ・ カンマ区切りなどのデータに比べ、データの内容が付加されているため、データの処理性、再利用性が向上する。
- ・ データ列の順番に依存せず、データ列の追加・削除を容易に行うことができ、データの拡張性に優れる。
- ・ 既存の XML パーサライブラリを利用することで、確実なデータハンドリングやデータ検証などが容易に行える。
- ・ ウェブページ形式に容易に変換できる。

一方で、データ量が数倍になるという欠点があるが、現在の高速な計算機と通信速度により十分に対応できる。XML を採用することで、デバイス層の機器が一つ増えても、一つのデバイスタグを追加するだけで、通信部などを変更する必要がなくシステム

の拡張性に貢献する。

4. 4 XMLスキーマの開発

XMLは、データ形式を自由に設計することが可能である。仰角データの場合は以下のような複数の定義が可能である。

```
<Azimuth unit="Degree">30.3</Azimuth>
```

```
<Az unit="Degree">30.3</Az>
```

XMLスキーマは、仰角を示すタグは“Azimuth”であるという、XMLデータを定義する方法である。本地上局システムに使用するXMLスキーマを以下に示す。

- ContactXML：地上局操作に関するユーザ認証やセキュリティ管理の為に用いる
- Ground Station Markup Language (GSML)：地上局の各デバイス状態を保持し、地上局の操作履歴として管理される。
- CUTE-I Markup Language (CUML)：CUTE-Iのテレメトリデータから得られたハウスキーピングデータや姿勢角などを管理する。
- Scalable Vector Graphics (SVG)：軌道図などの2次元データの表示に用いる
- Extensible 3D Graphics (X3D)：CUTE-Iの3次元モデルデータや3次元軌道図表示などに用いる。
- Simple Object Access Protocol(SOAP)：地上局システムを遠隔地から制御する際に利用するXMLデータを用いたRPC(Remote Procedure Call)のプロトコル

このうち、GSMLおよび、CUMLは本研究で独自開発したXMLスキーマである。採用したXMLスキーマとして、名前空間が扱うことができ、世界標準の“W3C XML Schema”を採用した。CUML, GSMLは、人工衛星および、地上局システムのデータを表現しているもので、今後世界的に公開していき、共通化を図っていく。CUMLはCUTE-I用に開発したものであるが、衛星姿勢角、温度データなどは、あらゆる衛星でも利用が可能である。またGSMLに関して、東工大地上局用に開発したものであるが、無線機の周波数やアンテナの指向方向などは、共通して利用が可能である。衛星や地上局に固有の仕様は、CUML, GSMLを拡張する形で実装することで、将来の様々な拡張に対応できるXMLスキーマになると考えている。図2にGSML、図3にCUMLの一部を示す。

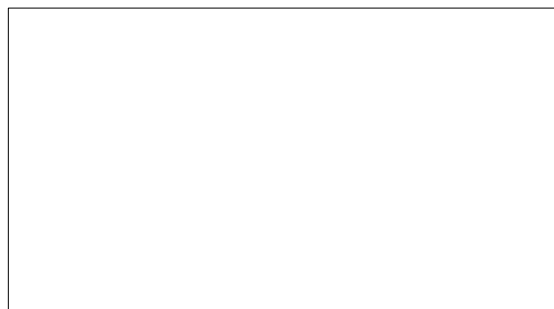


Fig.2 Ground Station Markup Language (GSML)

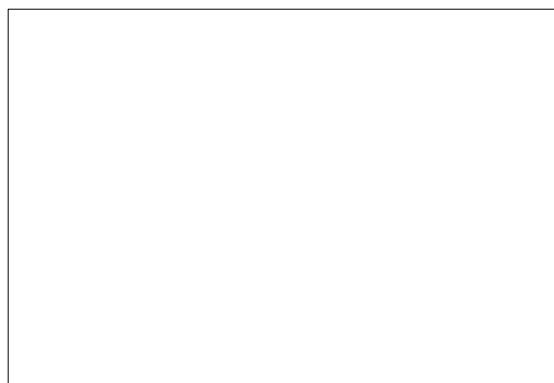


Fig.3 CUTE-I Markup Language (CUML)

4. 5 データベースの構築

データストア層で管理しているデータベースは、地上局履歴(GSML)やテレメトリデータ(CUML)だけではなく以下に示すようなデータを保持・管理している。

- 地上局データベース：日本の全市町村庁および、世界主要都市の位置データ（経度・緯度・高度・タイムゾーン）を保持。
- 衛星データベース：主な人工衛星の主要データや軌道情報を保持している。軌道情報は、NORADから自動でデータを取得し常に最新の軌道情報を管理している。
- 地上局操作履歴データベース：地上局デバイスの操作履歴などをGSMLを用いて管理している。
- テレメトリ・コマンドデータベース：人工衛星から取得したテレメトリデータやコマンドアップリンクデータを、CUTE-Iの場合は、CUMLを用いて管理している。

5. 地上局システムのソフトウェア開発

上述の機能を満たす地上局システムを実現するソフトウェアの開発を行った。今回の地上局システムは、開発後の拡張性などは優れるが、初期開発が非常に複雑であった。

5. 1 デバイス層の開発

CUTE-Iを運用するためのアンテナや無線機など

の機器は、全て RS-232 のシリアル通信を用いて制御できる。デバイス層は、Linux 上に C++ 言語を用いて開発した。

5. 2 ロジック層の開発

ロジック層は、データ処理系（ロジック部）、ウェブサーバ系、SOAP サーバ系に大別し開発した。ウェブサーバ系、SOAP サーバ系は、独自開発を避けオープンソースプログラムを採用し実装した。ロジック部は、Java を用いたコンポーネント技術を用いて開発を行い、様々なロジックを容易に追加・実装できる仕組みを採用している。SOAP は、XML ベースの RPC プロトコルであり、後述する地上局システムの遠隔制御に利用する。

5. 3 データストア層の開発

データストア層は、Linux 上に、オープンソースの RDBMS サーバおよび、XML Native サーバを導入し、構成されている。実績および信頼性のある RDBMS によるデータの管理および、XML データをそのままの形で保持できる XML Native サーバを用いている。

5. 4 ユーザ層の開発

本地上局は、基本的に全てウェブブラウザを用いて制御することが可能である。そのため、ユーザ層に対して特別な開発する必要がない。一方で、無線機やアンテナの周波数制御など、ある程度制御周期が早いものに対して、ウェブブラウザでは応答性が悪く制御に向かない部分がある。CUTE-I の運用に対してもその問題は発生し、地上局制御ソフトウェアを開発し、ロジック層とソケット通信を行うことで、運用をしている。

5. 5 地上局ネットワークへの対応

地上局ネットワーク (Ground Station Network: GSN) は、世界中に散在する地上局をインターネットを用いて接続し、世界規模で衛星の追跡管制を行うことを目的としたプロジェクトである。本地上局システムは、GSN プロジェクトで開発された地上局遠隔制御プロトコル (GSN Protocol) に準拠している。その為、GSN Protocol に準拠した、クライアントソフトウェアを利用すれば、本地上局は世界中から遠隔制御が可能である。

5. 5 Ground Station Data Center(GSDC)の構築

データストア層で管理されているデータをインターネット上に広く公開するために、Ground Station

Data Center(GSDC)を開発した。GSDC では、データストア層で管理された XML データをウェブ形式に動的に変形してユーザ層に公開する。GSDC では、衛星データ、地上局操作履歴、衛星データベースなどのデータを閲覧することが可能である。また、地上局の位置および衛星の軌道情報とロジック層の軌道計算アルゴリズムとあわせて軌道計算を行い衛星の軌道図など SVG と呼ばれる XML 技術を用いて表示することが可能である。図 4 に SVG を用いて表示されている軌道図を示す。NASA などが、ウェブ上で軌道計算する機能を実現しているが、本システムでは軌道計算を全てサーバサイドで行い、軌道図なども XML を用いて表現することで、携帯電話でも軌道計算が可能であり、また、他のアプリケーションなどへの 2 次応用が可能である。



Fig.4 Orbital Map (SVG).

軌道計算および軌道図の表示などは、衛星に共通の機能であり、今後の衛星開発においても変更なく利用できる。また、同様の技術を用いて、軌道図を 3 次元で表示できる機能も実装した。GSDC は以下の URL から参照できる。

GSDC: <http://gsas.mes.titech.ac.jp>

GSDC Mobile: <http://gsas.mes.titech.ac.jp/mobile>

5. 6 CUTE-I 運用データシステムの開発

CUTE-I 打ち上げ後、実際に運用を行う際、コマンドアップリンク履歴、時間、および運用の人員当番表など事務的なデータが必要になり、そのデータの管理は困難をきわめた。そこで、CUTE-I の運用の際に必要な運用データを全て管理し、データの書き込み・閲覧を全て Web で行う、CUTE-I Operational Data Explorer (CODE)を開発した。CODE では、地上局位置を入力すると、衛星可視時間を計算し、パスナンバを記録する。各パスに対して、運用人員配置、運用記録などの情報を記録していく。保存されたデ

ータは、ウェブブラウザで閲覧することの他に、規定したフォーマットで動的に PDF 出力、電子メール送信などが可能である。

5. 7 オープンソース開発

本地上局システムは、オープンソースオペレーティングシステムを用い、ウェブサーバ、アプリケーションサーバなども全てオープンソースのソフトウェアを採用している。独自に開発した、デバイス制御部、ロジック部、CODE なども含め、安定性の動作確認後、プログラムソースを公開する予定である。地上局システム全てを構成するソフトウェアをオープンソース開発することで、システム開発時のコストを抑えることができる。

5. 8 ネットワークセキュリティに関して

本地上局システムは、層状に分散管理され、層間通信は IP ネットワークを採用している。その為、セキュリティに関するリスクが発生する。現在、CUTE-I の運用では、層間通信に関して SSH を用いたポートフォワーディング機能を用いて通信データを暗号化し運用を行っている。暗号化に関わる通信オーバーヘッドも特に問題にならず安定した運用を行っている。一方でウェブベースのデバイス制御や、SOAP ベースの遠隔制御に関しては、SSL を用いて暗号化し遠隔制御を行うことが可能である。更に、4 つの層を IPSec による VPN 上に配置し、仮想的な LAN の上で運用を行った。VPN 環境下でも、安定した運用を行うことができた。

6. CUTE-I の運用

本地上局システムを用いて、CUTE-I 打ち上げ以降運用を行っている。3 ヶ月近い運用を迎えるが、ハードウェア的、ソフトウェア的に大きな問題もなく運用を行っている。打ち上げ当初 5 人で運用していた人員配置も、現在はハードウェアオペレータおよび、テレメトリ監視・コマンド送信オペレータの二人運用まで省人数化された。これは、CUTE-I が定常運用に入ったこと、オペレータが運用作業を熟知したこと、CODE によるデータの管理などが挙げられる。

7. 結言

本稿では、東工大地上局システムの開発と、CUTE-I 運用について述べた。開発した地上局システムは、最新のインターネット技術、XML 技術、オープンソ

ース開発を取り入れ、拡張性・データ処理性・公開性、低コストを実現したシステムである。本地上局システムは、初期開発が非常に複雑であるが、構築後は、様々な仕様変更に対応できるシステムである。本地上局システムを用いて研究室が本年度打ち上げた CUTE-I の実運用を行い、システムの安定性、機能性などを確認した。開発した地上局は機器こそ CUTE-I 用ではあるが、ソフトウェア部は、大規模な地上局システムにも耐えうる設計である。今後は更に拡張性、利便性などを追求した地上局システムを提案していく予定である。

謝辞

本地上局システム開発に関して、大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC)からシステムの保守・管理費として支援を頂いた。

参考文献

- [1] Naoki Miyashita, Koji Nakaya, Kyouchi Ui and Saburo Matunaga, "Internet and XML-based Extensible and Low-Cost Ground Station System," 54th International Astronautical Congress, International Astronautical Federation, Bremen, Germany, Oct, 2003.
- [2] Naoki Miyashita, Masafumi Iai and Saburo Matunaga, "Fundamental Strategy and Implementation of Internet-Based Remote-Controllable Ground Station Network for Small Satellites," Proc. 12th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS, Sagamihara, June, 2002.
- [3] 宮下直己, 居相政史, 中谷幸司, 松永三郎, "小型衛星運用のための遠隔操作型地上局ネットワーク," 第 46 回宇宙科学技術連合講演会 CD-ROM, 小金井, 2002 年 10 月, 3E5.
- [4] GSML, Ground Station Markup Language, Tokyo Institute of Technology, LSS, <http://lss.mes.titech.ac.jp/gsp/gsml.xsd>
- [5] CUML, CUTE-I Markup Language, Tokyo Institute of Technology, LSS, <http://lss.mes.titech.ac.jp/gsp/gsml.xsd>
- [6] W3C XML Schema, World Wide Web Consortium (W3C), <http://www.w3.org/XML/Schema>.
- [7] CODE, CUTE-I Operational Data Explorer Tokyo Institute of Technology, LSS, <http://gsas.mes.titech.ac.jp/code/>