

宇宙インフラストラクチャー技術の研究

Research on Space Infrastructures

宇宙機の自動自律化技術の研究

Research on Automation and Autonomy of Space systems

システム誘導技術グループ 小田光茂, 稲場典康, 山本昌幸, 川井洋志  
宇宙科学研究本部宇宙探査工学研究系 福島洋介

Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group

Mitsushige Oda, Noriyasu Inaba, Masayuki Yamamoto and Hiroshi Kawai

Department of Spacecraft Engineering of ISAS

Yousuke Fukushima

## Abstract

Autonomy in space systems is a promising way not only to expand performance and functions of systems but also to achieve cost reduction, particularly in large and complicated systems and constellations. Now a day, a number of constellation systems are proposed or under development which provide advanced services in earth observations, tele-communication and satellite based navigations. We newly organized this spacecraft autonomy research area in 2002, and defined two target missions, constellation for Earth observation and rendezvous spacecraft such as HTV. We started to study on three themes related with the target missions, autonomous orbit maneuvering function, intelligent vision and AI based ground support systems for rendezvous operations from fiscal year 2003. Major results of these studies are reported.

## 1. はじめに

近年複数の衛星を利用し、単独衛星では達成が困難な高度なミッションを達成する地球観測や通信・測位を行う衛星群システムが多数構想されている。これらシステムでは、撮像時間の同期や衛星間位相の保持のための同期軌道・姿勢制御、先行衛星の取得データ処理に基づく後続衛星の運用の迅速な変更等、状況に応じた多彩・高度な運用機能が求められる。また、複数衛星を同時に運用することから、ルーチン的なハウスキーピング運用や異常発生時対応運用も、自動化することにより効率的な運用を行う必要性が生じる。これらの実現のためには、長足の進歩を遂げる搭載計算機の能力や、複雑化・高度なソフトウェアの確実な開発・検証方法も念頭の上、地上システムとの適切な役割分担のもと、宇宙システムの自動化・自律化技術が不可欠である。本研究は、次期ミッションの高度化、あるいは省力化に有用と考えられる自動化・自律化要求を整理し、共通的な技術課題あるいは、先行的な研究が不可欠な要素を識別、技術研究を行うものである。

## 2. 研究の概要

平成14年度実施したニーズ調査に基づき<sup>[1]</sup>、当面は「地球観測衛星群システムの高度化・高機能化」、及び「HTV等ランデブ宇宙の運用確実化・省力化」を対象とし、関連技術の研究を行うこととした。平成15年度はこれらを対象とした、以下の3つのテーマについて研究を開始した。

## (1) 高精度軌道保持のための自動軌道制御技術の検討

高精度軌道決定、恒星センサの利用等により地球観測衛星撮影画像の地球座標系とのオフライン対応の技術開発が進行中であるが、一歩進んで、地球座標系で指定される「撮りたい点」を与えられた場合に、衛星の軌道位置・センサ視野方向を勘案の上、シャッタタイミングを決定する技術のニーズは高い。特に、視野が狭く、センサ指向のずれが目標観測の失敗に繋がる高分解能での観測において、上記要求はより大きなものとなる。

また、観測データの解析は現在全て地上で行われているが、解析アルゴリズムが定式化されると搭載系計算機の処理により一定の監視結果・予兆発見等が可能になることが予想される。地上運用者を經由し煩雑な運用計画を行う事無く、予兆発見時に当該点の観測頻度を向上させるための、搭載系によるミッションデータ解釈とこれに基づく衛星群システムの撮像計画の自動変更や複数衛星間の連携運用の実現も中期的な技術開発の目標にできると考えられる。(Fig. 1)

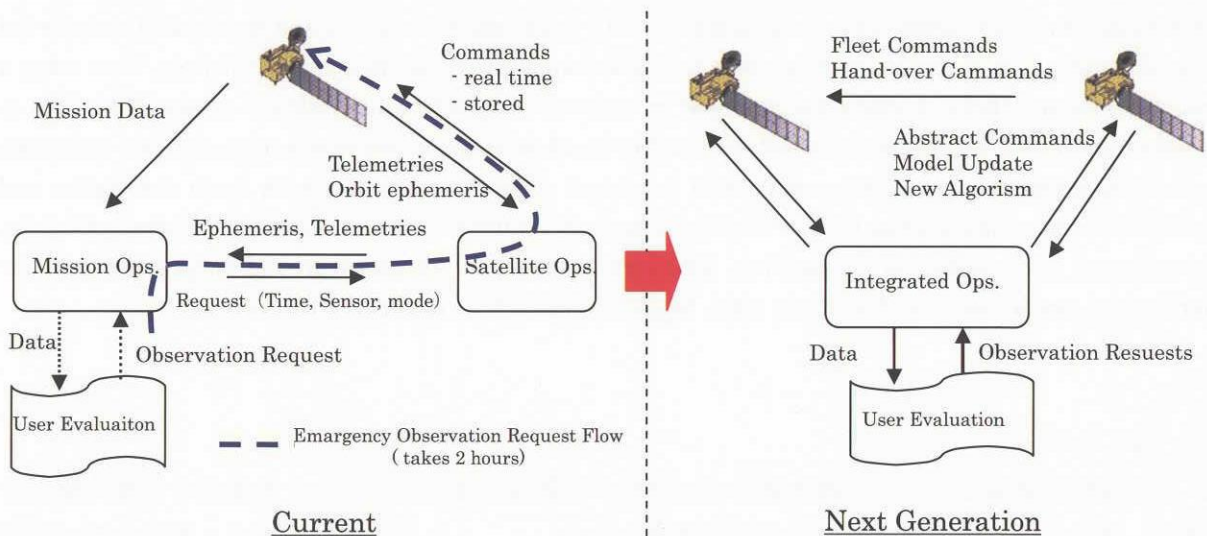


Fig. 1 Data and command flow of Earth observation satellite system

また、雲、日陰の影響を受けずに、常時高分解能観測が可能になる合成開口レーダ (SAR) によるインターフェロメトリ観測への要求も高まってきている。インターフェロメトリ作成の一方式である適切な前後距離を保ちつつ飛行する2衛星による取得データを干渉させるタンデムフォーメーションフライト方式では、飛行経路2衛星の相対飛行位置を正確に制御することが求められる。また、基準軌道上を精密に飛行することにより、時系列データの相互比較からインターフェロメトリを行うミッションでは、1kmを切る精度での高度及び経度方向の精密な常時軌道制御が望まれる。個々の衛星を所定の軌道上許容範囲に保持するコントロールボックス制御の精度向上と、更にこれを一歩進めた、相対位置制御の技術を、ETS-VIIの自動ランデブ技術をベースに、地上の運用負荷を少なく実施する方策が求められる。また、事態発生時の軌道変換等による迅速な撮像機会の確保等に対する要求は前述のとおりである。ミッション要求から決定される相対位置保持要求を吟味の上、衛星間の測距、通信手段の必要性、搭載系へのコマンドの与え方等を検討する必要がある。重力ポテンシャルの歪み、地球大気、及び太陽・月引力等の各

種摂動による軌道変化をシミュレーションし、基準軌道を精密に制御するための制御頻度、制御量を解析し、更に搭載 GPS 受信等の航法情報を利用した搭載系内の閉ループにより面内、面外を含めた自動軌道制御の基本アルゴリズムを検討した。

### (2) インテリジェント・ビジョンの検討

現状、機構展開の確認用モニタカメラは通例として衛星に搭載されているが、取得画像は展開の定性的目視確認に留まっている。一方、柔軟構造物の軌道上での共振周波数、形状等の特性を把握することは、姿勢制御系のチューニング（ハッブル宇宙望遠鏡で利用）、アンテナパターンの変形把握（DRTS）等、ミッションの質を向上させる上で重要な意義を持つ。また、変調発生時に特定部位の画像取得はトラブルの原因究明に資する情報を取得できる可能性も有する。

また、先般のコロンビア号の事故や、間近に控えた国際宇宙ステーションの本格的運用を契機に軌道上宇宙機の点検技術に関する関心が高まっている。軌道上宇宙機は、真空・放射線・熱、ならびに宇宙デブリ等の環境による影響により劣化する。これら劣化の状況は種々のセンサにより把握・計測が可能であると考えられる。平成15年度は、振動・形状同定や外観点検用のインテリジェントビジョンの機能要求整理を行うとともに、カメラセンサを利用した、太陽電池パドルの振動同定基礎実験、CMOS 画像センサの非線形ゲイン調整機能を利用した、高ダイナミックレンジ実現のための基礎実験を行った。

### (3) ランデブ地上系の知能化検討

異常事象発生時に太陽指向モードとすることで安全状態を確保できる地球近傍の通常の人工衛星と異なり、ランデブ宇宙機運用は、ターゲットとの「衝突」や「離別」の危険から、一息つける安全な状態 safe state を確保することが非常に難しい運用である。安全確保の急を有する運用のみならず、正常の手順に於いても、状況、不具合の原因等に応じて手順の分岐が多く発生することもランデブ運用の難しい点である。初期運用のシーケンスに沿った運用手順等の代表的例のみが事前に設計者の「思考運用」に作成され文書化されるが、実運用に臨み、この範囲に無い手順の作成に迫られ、運用室内で既存手順の組合せにより新たに手順を作成するケースは多い。以上のとおり、運用前、並びに運用開始後にも短時間に確実な運用計画を作成することが必要である。これには探索ロジック等を利用したコマンド列の作成や、環境（太陽位置、大気抵抗、GPS 位置、DRTS 位置）並びに衛星機能（送信コマンドに連動し、機器状態ならびにスラスト噴射により軌道位置が変化する。等）双方を模擬したシミュレーターを整備することにより、実機送信前のコマンド列の整合性確認が有効な手段と考えられる。その際、シミュレーターの機能範囲や精度は必要度を踏まえ適切な範囲・規模に設定するとともに、過去の運用経験を通して得られたノウハウ（マニュアルマヌーバによる軌道設計法、衛星間通信レベルの測距離への利用等）を系統的に整理・形式知化し計画作成機能に入れ込む仕組みを構築する必要がある。

一方、整合性をもって作成・確認された分岐付き運用計画の手順も、その複雑さゆえ運用者の記憶限界を超えるとともに、条件分岐に必要な state、状況の把握も、現状テレメトリデータを羅列する運用装置では非常に困難であるのが実情である。情報を統合し運用者にタイムリーに適切な方法で道標を与える仕組みが必要であると考えられる。

また、safe state 確立後に行う、複雑な不具合原因の特定、対応策の検討は、テレメトリグラフ

と FTA を源泉とし、人間の手作業による仮説推定に頼っており、長期の時間を要しているのが現状であり、テレメトリデータとシミュレーターを利用した逆問題解法等による支援機能による高速化が期待される。平成 15 年度は、上記ランデブ地上系に求められる機能とその緊急度の検討を行うとともに、HTV 運用で喫緊の課題である運用者への情報の統合・効率的表示機能についてその実現方法の検討を行った。

### 3. 成果の概要

#### (1) 自動制御技術の検討

一部の先端衛星で実行されている自動軌道制御は、直下点経度方向誤差を 2km 程度に保つ面内軌道制御に限定されている。前述の将来ニーズに備えた、本検討で高度、進行方向とも設定された空間内の「誤差パイプ」の中を常時通過する様に、面内・外の制御を自律的に行う方策を考える。低軌道において、GPS 航法（1 周波単独航法）により自律的に推定可能な各種状態量の誤差の典型値を Table 1 に示す。本誤差を考慮した場合の、軌道高度 700km、降交点地方時 15 時軌道における、軌道面内面外同時制御の間隔と軌道保持精度(基準軌道からの距離)の関係例を Fig. 2 に示す。

Table 1 Estimation errors based on on-board GPS navigation

| Error Item  | Value                                | Unit         |
|---|--------------------------------------|--------------|
| Position  | 45.0                                 | m            |
| Semi major axis of the orbit                        | 4.824                                | m            |
| Inclination of the orbit                            | 0.00035                              | deg          |
| Thrust of engine                                    | 5.0                                  | %            |
| Decaying rate of Semi major axis                    | 57.97(Solar Max)<br>27.26(Solar Min) | %            |
| Derivative of inclination (i) due to Lunar gravity  | 0.0001                               | deg/0.5month |
| Derivative of inclination                           | 0.00004                              | deg/day      |
| Amplitude of periodic i change due to Lunar gravity | 0.00065                              | deg          |

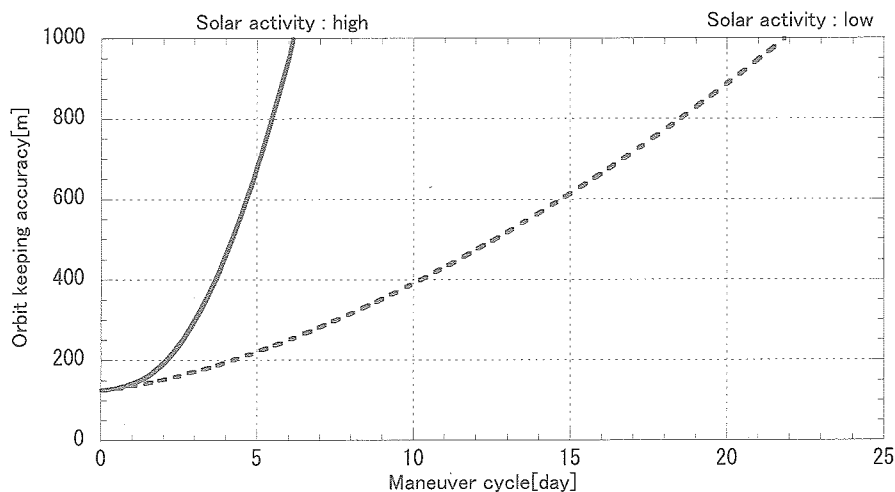


Fig.2 Maneuvering interval to keep required orbital accuracy(high:700km LST15,SSO)

太陽活動の大小により制御の頻度は変化するものの、搭載 GPS 情報に基づく自律航法により、面内・面外の自動軌道制御が可能である見通しを得た。平成16年度は、本検討を元に、搭載可能な自動軌道制御のアルゴリズム化を行う。

## (2) インテリジェントビジョンの検討

受光量に対する出力電荷のカーブを非線形に設定可能な CMOS カメラの機能(マルチスロープゲイン)を生かし、ダイナミックレンジの広い軌道上の画像を広範に撮像する基礎的な実験を地上実験装置を利用し行った。実験画像を Fig. 3 に示す。従来の CCD カメラでは不可能であった、輝度の大きく異なる地球と衛星が同一画像上で共にはっきりと識別できることが分かる。

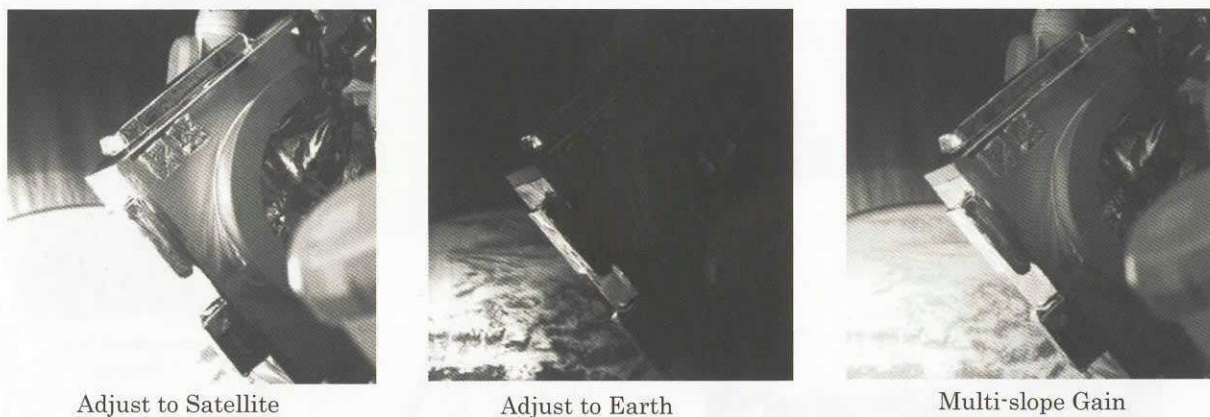


Fig. 3 Simulated image on orbit using CMOS multi-sloped gain function

また、太陽電池パドルの振動を画像処理により同定する実験を Fig.4 に示す実験装置により開始し、基本実験を実施した。平成16年度も継続実施する。

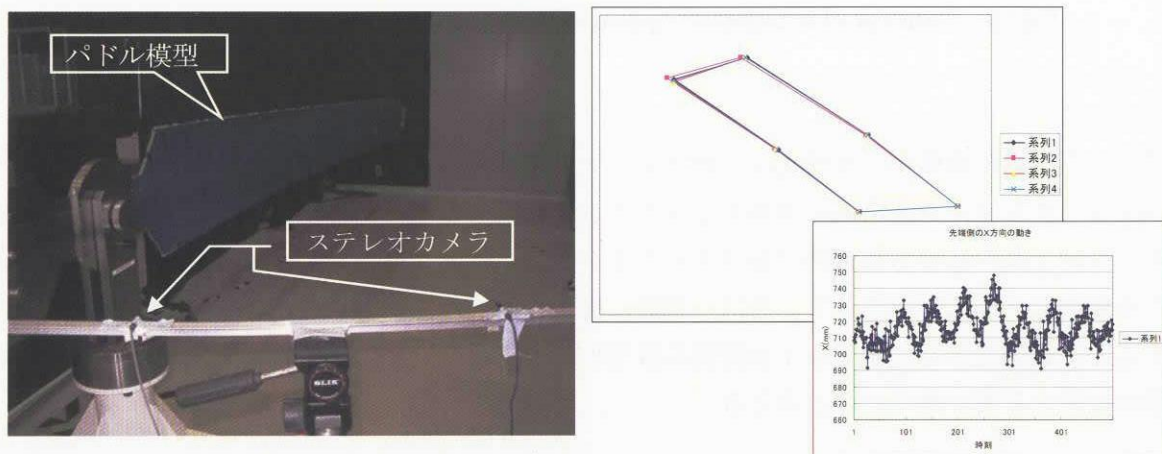


Fig. 4 Vibration monitoring using stereo camera vision

今後も上記研究を継続するとともに、民生品カメラの搭載化検討、種々のミッションの要請に応じた搭載ハードウェアの研究開発を行ってゆく。

### (3) ランデブ地上系の智能化検討

喫緊の要求である、統合表示系の構成を検討した。従来の種々独立作成・管理していた運用関連情報を一元的に管理する形態及び、運用者への統合運用表示のサンプル画面等を作成した (Fig. 5)。平成16年度は、プロトモデルの試作を行い、運用評価を実施するとともに、HTV運用や将来衛星運用への利用を目指した運用システムとの適合性検討等を行うとともに、テレメトリ情報を利用した宇宙機状態の自動モニタリングの手法検討等を、宇宙機の開発試験のデータ等を利用し行う。

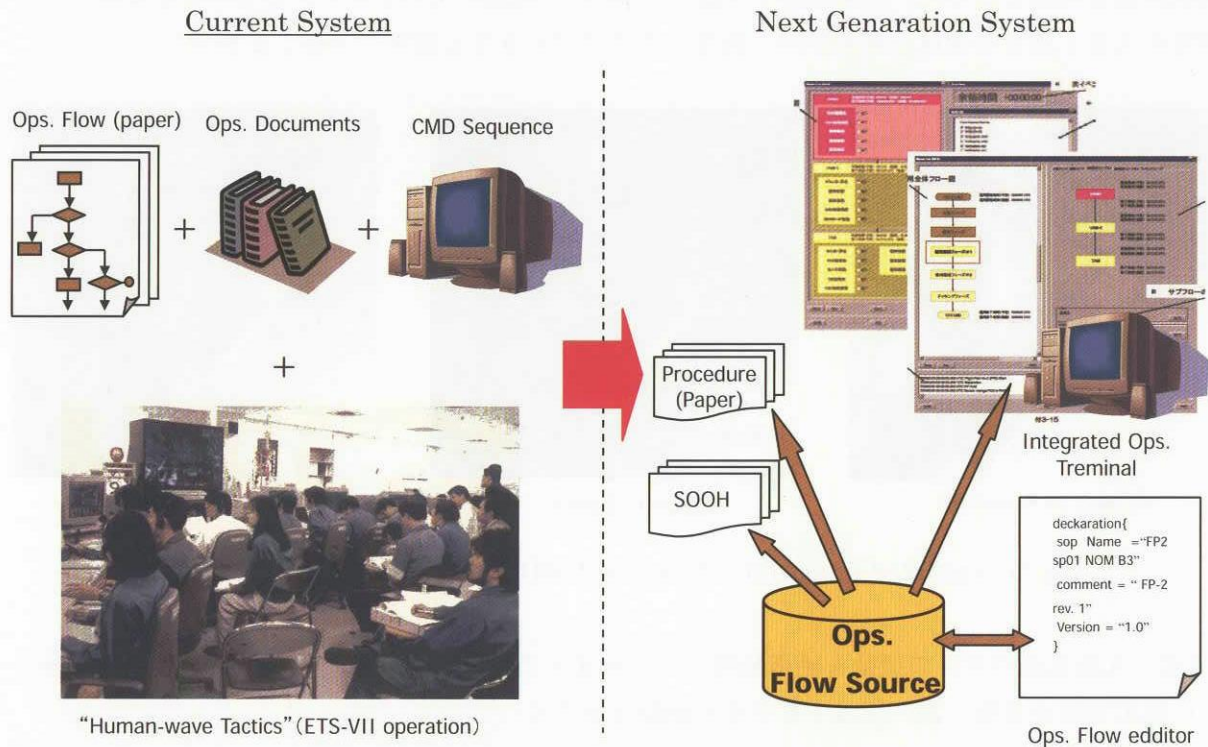


Fig. 5 Concept of integrated operation system for rendezvous operation

#### 4. まとめ

宇宙システムの自動化・自律化は、地上システムや海外の宇宙システムとの競合の中、魅力ある高度なミッションを経済的に実施するシステムを構築する上で、必須の技術である。長足の進歩を行う地上品の技術も積極的に取り入れるとともに、従来「搭載系」、「地上系」と別々に考えられる傾向にあった宇宙システムを同一視野に捉え、適切な機能分担の中でシステムを構築してゆくことが必須である。確実な宇宙開発の推進の先に控える、次の高い目標を実現化するための必須の技術を着実に進めたいと考える。

#### 【参考文献】

- [1] 稲場, 福島, 山本, 川井, 小田: 事象起因型コマンドによる衛星群の高度化・省力化運用, 第47回宇宙科学技術連合講演会, 予稿集 CD-ROM(2I18).