

# ロボット実験運用設備の運用

Operation of ETS-VII Robot Experiment Operation Facility

稲場 典康  
INABA Noriyasu

高野 裕  
TAKANO Yutaka

池内 正之  
IKEUCHI Masayuki

武川 洋一  
TAKEKAWA Youichi

ETS-VIIロボット実験運用設備について概説する。この運用設備を用いて、世界初の地上からの遠隔制御による無人ロボット実験運用を継続中であり、搭載機器の評価を含めた実験に成功している。

この運用設備は、無人ロボット実験を行うために必要な運用機能の大部分を備えており、この実験を通じ軌道上での機器交換やサービスなどの将来ミッションに向けて、無人宇宙用ロボットを地上から遠隔運用する技術基盤が確立されつつある。

This paper presents the robot experiment operation facility of the Engineering Test Satellite VII(ETS-VII), which has been successfully performing the first experiments of remote manipulation in the world of unmanned robot experiments, including the checking of onboard experiment equipment.

This facility has almost all of the operation functions required to perform the new unmanned robot experiments on ETS-VII, through which the engineering infrastructure will be established for unmanned remote robot operations applied to future space missions such as exchanging orbital replacement units and performing in-orbit robotic servicing.

## 1 まえがき

1997年11月28日午前6時27分にH-IIロケット6号機により打上げられた技術試験衛星Ⅶ型(ETS-VII)は、宇宙用ロボット(RBT)技術と、ランデブ・ドッキング(RVD)技術の基礎を習得するための衛星である。

このなかで、衛星に搭載された宇宙用ロボット実験系は、宇宙開発事業団筑波宇宙センターに整備されたETS-VIIロボット実験運用設備から遠隔操作による実験が行われており、所定の実験が成功している。

ここでは、ロボット実験運用設備について、地上運用の観点から運用技術、運用方法について概説する。

## 2 ロボット実験運用設備の機能と構成

### 2.1 機能

宇宙用のロボットシステムの主たる構成要素はロボットアーム、制御計算機、実験対象機器、およびテレビカメラである。地上システムとして、この運用設備はこれら搭載機器による軌道上作業の目標を達成するために必要な以下の機能を備えている。

- (1) ロボット実験を計画し実行するための機能      ロボット実験計画立案、ロボット手順の作成・検証・送信、コマンド送信機能など
- (2) 地上からロボットを遠隔操縦する実験機能      事前に作成した電子手順によりコマンドを送信する自動操作機能と、ハンドコントローラにより指令を入力する

### 遠隔操作機能

- (3) 実験結果を確認するためのロボット監視機能      テレメトリモニタとカメラ画像データ再生・表示機能
- (4) 衛星運用と連携するために必要な衛星モニタ機能      ロボット実験に必要な衛星本体テレメトリのモニタ機能
- (5) 要員訓練を支援する機能      要員訓練に必要なシミュレーション機能や実運用操作・モニタを模擬する支援機能

### 2.2 構成

ロボット実験系全体のシステム構成を図1に示す。このなかで、地上系であるこの運用設備は、ETS-VIIロボット実験システム全体の運用機能の相当部分を備えている。

そして、2.1項の機能を実現するため、この運用設備は以下に説明するサブシステムで構成されている。

この運用設備の装置構成は、ロボット実験制御部を中心とする機能単位の分散型構成であり、ワークステーションとパソコンから成る計算機システムであり、応用ソフトウェアの規模は約50万ステップである。

- (1) ロボット実験制御部      ロボット実験計画立案、実験手順の作成・検証・送信、コマンド送信、アーム遠隔制御と操縦、アーム動作状態監視、実験データ収集と記録など
- (2) 運用モニタ部      ロボット実験の監視と、実験結果の確認に必要な情報のモニタ
- (3) 視覚系制御部      搭載視覚系へのコマンド送信、テレメトリモニタ、画像データ収集記録など

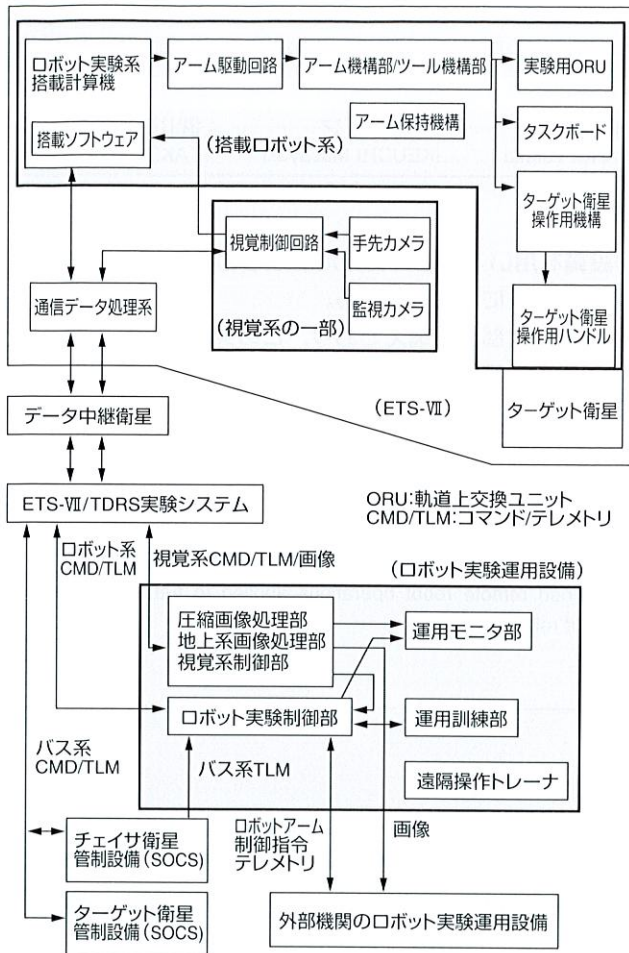


図1. ETS-VIIロボット実験系(搭載系/地上系)の構成 ETS-VIIの搭載ロボットと地上のロボット実験運用設備がロボット実験系全体を構成している。

Configuration of ETS-VII robot experiment system (onboard segment and ground segment)

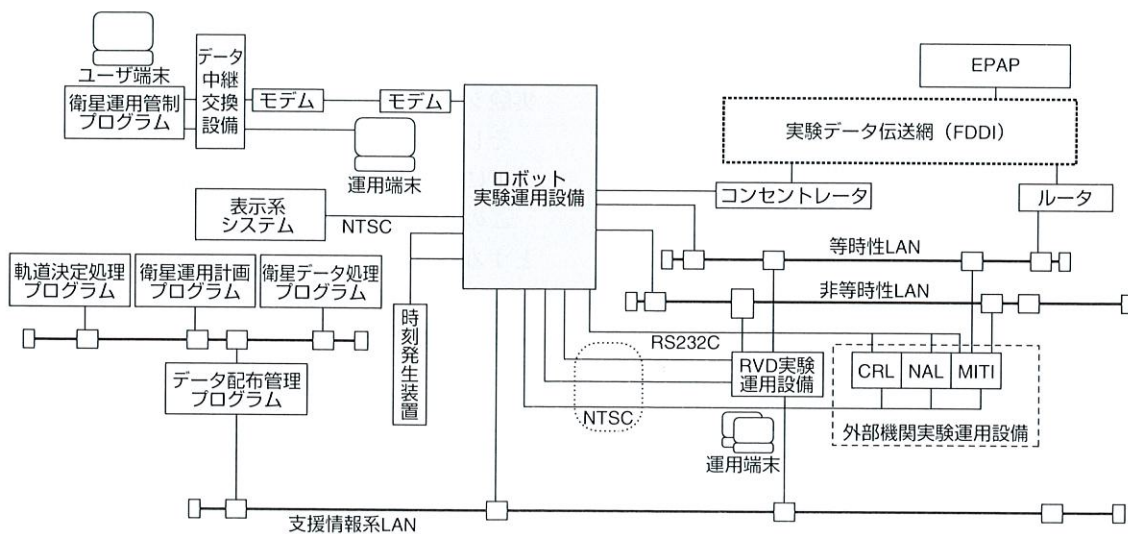


図2. ETS-VIIロボット実験運用設備のインタフェース

ETS-VIIロボット実験運用設備はETS-VII全体の運用設備とインタフェースをもっている。

Interface of ETS-VII robot experiment operation facility

- (4) 圧縮画像処理部 搭載視覚系からの圧縮画像データの展開・再生など
- (5) 運用訓練部 実験電子手順検証と訓練支援のための実験データのシミュレーション
- (6) 遠隔操作トレーナ 遠隔操作訓練用のハードウェアロボットアーム(ロボット実験管制エリアとは別棟に設置され、システム開発にも寄与した。)

### 3 ロボット実験運用設備のインタフェース(図2)

ロボット実験運用ではコマンド送信とテレメトリモニタに米国航空宇宙局(NASA)の追跡データ中継衛星(TDRS)を使用している。

実験に要する TDRS 利用要求はユーザー端末を介して入力している。この運用設備と搭載ロボット系のインタフェースは筑波宇宙センターに設置された実験パケット処理装置(EPAP: Experimental Packet Processor)による。

通信方式は、CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems:宇宙データシステム諮問委員会)である。衛星本体のデータベースは衛星運用管制プログラムから受信する。

また、この運用設備は、外部機関(通産省電子総合研究所: MITI, 科学技術庁航空宇宙技術研究所: NAL, 郵政省通信総合研究所: CRL, 欧州宇宙機関: ESA, ドイツ航空宇宙センター: DLR)の各実験運用設備に対し、ロボットテレメトリとカメラ画像を配信し、コマンド送信を支援している。

#### 4 ロボット実験運用設備の運用

この運用設備の留意点は、ロボット実験システムに関する6.5秒程度の通信時間遅れと、TDRSの利用時間制限であり、これらを中心に運用について説明する。

この運用設備から送信されたコマンドは、国際商用回線を経由してNASAゴダード宇宙飛行センター(GSFC)へと転送され、NASAネットワークを経由してTDRS地上局(米国ニューメキシコ州)に送られ、同局からTDRSに送信される。テレメトリは同一経路をコマンドと逆方向に伝送される。この間、約6.5秒程度の時間遅れが累積する。

高度約550kmのETS-VIIがTDRSと通信可能な時間は軌道1周回(約100分)のうち約42分である。この時間から、通信衛星との通信確立に必要な時間を引いた約40分以内でミッションを終了するように、およそ50個のコマンド実験計画を立案し実験している。

ロボット実験運用時間は、連続する軌道5~6周回の可視時間帯で行われる。また、通信衛星として利用するTDRSおよび照明として使用する太陽の軌道上位置の関係から、運用時間帯は日本時間の深夜から明け方に訪れる。

まとまった1単位の実験結果を得るためには、3日間のTDRS利用が必要であり、通常は約3週間前に予約して、約1週間前に利用計画を確定している。

この運用設備は、以下の3モードで運用している。

##### 4.1 プリパス運用モード

ロボット実験運用の準備をする実験前運用である。実験運用計画を立案し、衛星全体の計画系にロボット側の計画を通知することができる。

実験運用に必要なTDRSのサービスを受けるために



図3. ロボット実験運用設備の操作卓と運用画面例 ロボット実験運用設備はコンパクトな運用卓とグラフィックなコマンド実行・表示ソフトウェアなどで構成している。

Operation console and displays of ETS-VII robot experiment operation facility

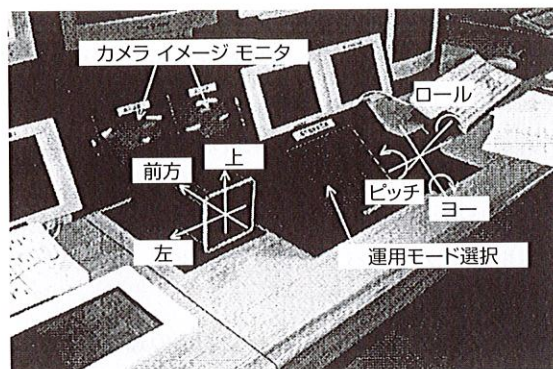


図4. 操作卓の遠隔制御用ジョイスティック ロボット実験運用設備は地上から遠隔操作で搭載ロボットを操縦することができる。

Remote control joystick of ETS-VII robot experiment operation facility

ETS-VIIの利用期間を、その軌道周回(パス)数をもとに識別した値で指定して、希望運用時間帯を確保している。

この運用設備(図3, 図4)を用いて、実験前に必ずロボット実験の電子手順作成・編集・検証を実施し、必要に応じて実験運用を模擬した要員訓練やりハーサルを実施してきた。この機能は運用訓練部の実験データ模擬機能による。

運用訓練部は、搭載用ロボット実験搭載計算機(RMOC: Robot Mission Operation Computer)の開発モデルを含み、実験前の運用手順検証や訓練支援に多大な寄与をしている。

このロボット実験のコマンドは100種類以上あり、なかには1コマンドとして設定するパラメータ(変数)が最大30種類を超えるものがある。これらのコマンドを、実時間で選択してパラメータ設定する時間的余裕はないので、運用者への利便性を考えて、地上で搭載系コマンドパラメータを自動計算してコマンド作成時の負荷を軽減させた。

例えば、搭載系ではアームの開始点、終了点、動作距離の3成分を入力しているが、地上系では開始点、終了点を入力すれば、運用設備が動作距離を自動計算する。

##### 4.2 パス運用モード

実験運用状態のモードで、EPAPを介してロボット実験システムに対しコマンド送信、テレメトリ受信を行う。

実験手順進行は、計算機画面上のフローチャート形式で示された電子手順で確認している。実行結果は視覚系制御部で再生した実画像とテレメトリデータ、およびアニメーション画像で確認している。

特に、ロボットアーム動作指令送信時は、搭載ロボットシステムに送信されるコマンドの実施結果となるアームの予測動作を、実運用中かつアーム動作コマンドの実施直前にシミュレーションにより確認し、接触やアームの特異姿勢などをチェックし、適切なコマンドを送信している。

この運用設備の実時間シミュレーション機能であるアームの外部干渉に関するチェックでは、ETS-VIIロボット実

験パネル面を100×100以内のメッシュに区切り、メッシュごとの許容高さ、アーム先端などのチェック対象点の高さを比較している。シミュレーション結果は、アニメーション表示されるので、運用者全員が事前に動作イメージを確認して、連携した確認作業時間や負荷を軽減している。

この運用設備は、必要な表示画面を機能ごとに集約しており、運用卓はスーパーバイザ用、モニタ用、コマンド用など、役割に合わせた表示をしている。

自動的なテレメトリモニタとして、この運用設備は計算機能力の範囲でリアルタイムに状態を検知できる。異常動作を検知すると、アームを搭載側で自動的に停止させる安全機能をもっている。同様に、操作性を向上させるために、

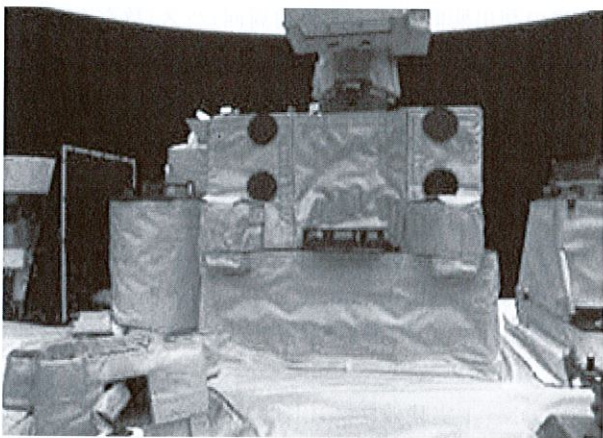


図5. 搭載ロボットの肩監視カメラでとらえたロボット実験映像  
上部の白く丸い部分は地球で、下の機器は衛星ロボット実験パネル面である。

Picture from onboard shoulder camera during ETS-VII robot experiment operation

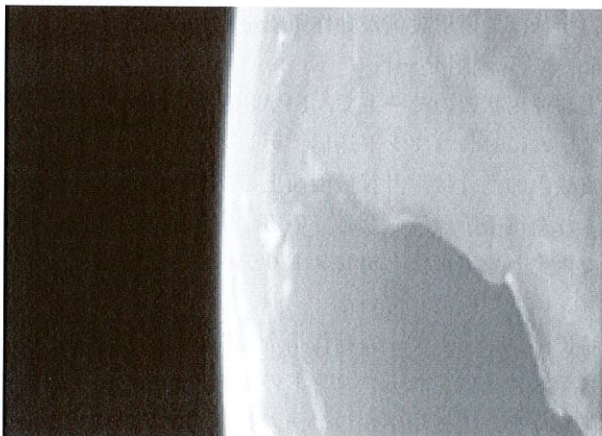


図6. 搭載ロボットの手首カメラでとらえた地球の映像 右側が地球である。

Picture of the Earth from onboard wrist camera during ETS-VII robot experiment operation

テレメトリの確認を自動化し、ロボット実験運用担当者が実験に必須のテレメトリ確認に集中することができる。

コマンドの自動判定については、コマンド送信可能条件を満たしているか、コマンド送信の際のシミュレーション結果が正常か、コマンドが搭載系に正常着信したか、コマンド実行中の状態が正常か、コマンド実行が終了したか、コマンド実行後に予定の状態になったかなどを、テレメトリやシミュレーション値から自動判定できる。この運用設備が異常を識別すれば、その項目の基準値とテレメトリ値を、自動的にポップアップできるので、運用担当は次コマンドの送信を中断するか継続するか判断できる。

遠隔操作のためのジョイスティックの操作はアーム動作と視覚的に適合している。

ETS-VII実験画像は白黒である。JPEG圧縮データとして取得した画像データは、この運用設備で伸展され視覚系制御部により実時間で再生されモニタできる(図5, 図6)。実験画像はインターネットで公開されている。

#### 4.3 ポストパス運用モード

ETS-VIIの各周回(パス)運用で取得したテレメトリデータや搭載ロボットに送信したコマンド履歴は、この運用設備で保存する。実験中に取得したテレメトリデータは、グラフ表示により評価している。

## 5 あとがき

ETS-VIIにより、世界初の地上からの遠隔制御によるロボット実験運用を継続中である。この実験を通じて無人衛星に対する地上からのロボット遠隔運用の技術基盤が、確立されつつある。



稲場 典康 INABA Noriyasu

宇宙開発事業団 衛星システム本部 ETS-VII プロジェクト チーム副主任開発部員。ETS-VIIのロボット実験系の設計・開発・実験に従事。

National Space Development Agency of Japan



高野 裕 TAKANO Yutaka

宇宙開発事業団 衛星システム本部 ETS-VII プロジェクト チーム副主任開発部員。ETS-VIIのロボット実験系の設計・開発・実験に従事。

National Space Development Agency of Japan



池内 正之 IKEUCHI Masayuki

情報・社会システム社 小向工場 宇宙情報システム技術部参事。ETS-VIIロボット実験運用設備の開発・設計に従事。

Komukai Operations



武川 洋一 TAKEKAWA Youichi

情報・社会システム社 小向工場 宇宙情報システム技術部参事。ETS-VIIロボット実験運用設備の開発・設計に従事。

Komukai Operations