

## ETS-VIIロボット実験運用評価

Robot Experiment Subsystem of Engineering Test Satellite VII

小田 光茂  
ODA Mitsushige稲垣 哲哉  
INAGAKI Tetsuya西田 信一郎  
NISHIDA Shin'ichiro

技術試験衛星VII型(ETS-VII)ロボット実験系は、軌道上での衛星保守、修理などの軌道上サービスを目ざした宇宙ロボット技術の軌道上実験検証を目的として開発されたミッションサブシステムである。これまでの実験で、地上からの遠隔操作、プログラム制御動作、衛星姿勢制御との協調制御、各種の力覚制御を適用した精密作業、画像フィードバック制御による自律把持などの世界の宇宙ロボット開発をリードする各種の実験成果が得られている。

The purpose of the Engineering Test Satellite VII (ETS-VII) robot experiments is to demonstrate space robot technologies for the onboard maintenance, repair, and servicing of spacecraft. Many space robot technologies, such as tele-operation from the ground, preprogrammed control, cooperative satellite attitude and robot arm control, precision tasks using force/torque control, and autonomous capturing using visual feedback control, are being conducted using the robot experiment subsystem.

This paper introduces the missions of the ETS-VII robot and the results of the experiments.

## 1 まえがき

映画スターウォーズでは、R2-D2などのロボットが準主役として活躍した。外観は、これほど愛嬌のあるものではないが、宇宙開発で宇宙ロボットが活用される時代が始まっている。

国際宇宙ステーションの構築のように宇宙開発においては、大型宇宙建造物の組立てや点検、衛星への推進薬(以下、推薬と略記)や試料の補給、装置の交換、修理など種々の軌道上作業が必要となっている。これらすべてを宇宙飛行士に依存するのはコスト、安全性などの観点から問題があり、ロボットを利用することが望まれている。

1997年夏に行われたスペースシャトルでの宇宙ロボット実験(MFD: Manipulator Flight Demonstration)に続き、わが国が開発した宇宙ロボットが実際に宇宙で活躍している。98年3月から運用が開始されたETS-VIIのロボット実験系は、宇宙ロボットによる軌道上の宇宙機への保守・点検・交換などの軌道上サービスに必要な基礎技術の修得を目的としたサブシステムである。ここでは、その概要とこれまでの軌道上実験の成果について述べる。

## 2 サブシステムの構成

ロボット実験系の構成を図1に示す。ロボット実験系は、ロボットアームとこれを駆動・制御する搭載計算機、アーム駆動回路、ロボットの作業対象である軌道上交換ユニット(ORU: Orbital Replacement Unit)、タスクボード、国立研究所3機関の実験装置などから構成されている。こ

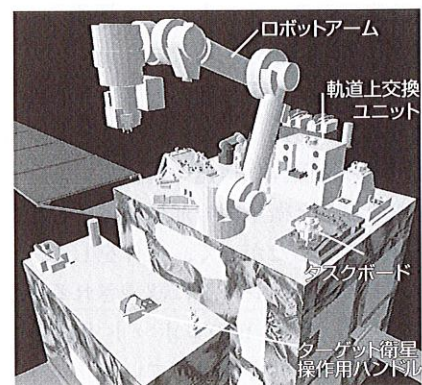


図1. ETS-VIIロボット実験系の構成 ロボット実験系の機器はチェイサ衛星とターゲット衛星の地球指向面上に配置されている。

ETS-VII robot experiment subsystem

れらはチェイサ衛星の地球指向面パネル上に配置されている。

ロボットアームは、約2m長の6関節の多関節型のアーム(図2)であり、手先には3本指の把持機構であるツール機構を備えている。関節やツールなどの軸受、減速機構などの可動機構部には、二硫化モリブデンや金による真空用固体潤滑が施されており、1年半のミッション期間の駆動に十分に耐える設計となっている。

## 3 制御システム

ETS-VIIのロボットの制御システムは、無人の衛星で各種の軌道上サービスを行うための技術として、次のような機能を備えている。



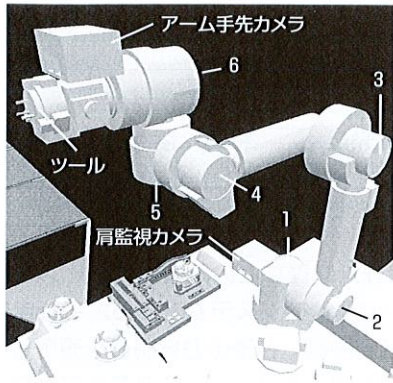


図2. ETS-VIIロボットアーム ロボットアームは6関節(図1~6)と先端の3本指ツールから構成され、ツールと肩関節上に双眼のテレビ(TV)カメラを備えている。

ETS-VII robot arm

- (1) 地上からの遠隔操作機能
- (2) プログラム制御機能(ロボット言語体系)
- (3) 力覚制御機能
- (4) アーム動作反動による衛星姿勢変動の軽減機能
- (5) 画像計測/画像フィードバック機能

### 3.1 地上からの遠隔操作

これまでの宇宙ロボットはスペースシャトル上での搭乗員による操作が主であった。ETS-VIIは無人の衛星であるため、地上からの遠隔操作機能を備えている。データリレー衛星経由での地上と衛星間の通信には、往復で約6秒の伝送時間が掛かる。したがって、操作をして、その結果が画像やテレメトリでオペレータに認識されるまでに約6秒掛かる。このため、ETS-VIIのロボット実験系では、次の方策により良好な操作性を確保している。

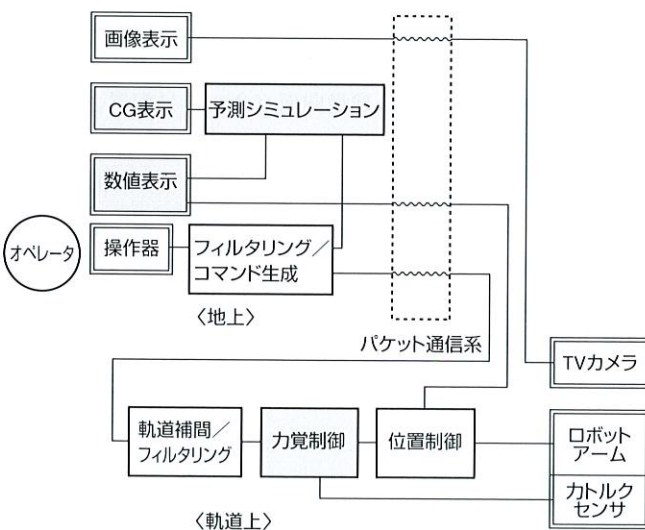


図3. ロボットの遠隔操作系統 通信の時間遅れは地上の予測シミュレーションと搭載力覚制御により補償している。

ETS-VII robot tele-operation system

- (1) 伝送遅れ時間による操作性の悪化を遅れない予測シミュレーションのコンピュータグラフィックス(CG)と数値表示により補う。
- (2) 操作誤差を搭載系のローカルな力覚制御機能により補償する。

遠隔操作系の系統構成を図3に示す。なお、動作状況は100ms周期のテレメトリとして軌道上から送られ、数値やCGアニメーションとして表示される。

### 3.2 プログラム制御機能

軌道上サービスにおいても大半のロボット動作は、定形的な動作であり、あえて密な人間の介在による遠隔操作を行う必要はない。そこで、専用のコマンド体系を構成し、コマンドのシーケンシャルな実行による自動動作により定形的な作業を行なっている。

コマンドは実験ユーザーである国立研究機関や外国機関(ESA:欧州宇宙機関, DLR:ドイツ航空宇宙センター)に公開されており、各機関の操作指令装置からロボット運用設備経由でコマンドを送信してロボットアームを操作する形で、各機関のロボット実験に利用されている。

### 3.3 力覚制御機能

地上のロボットでは、物を取り損なっても致命的な事態を生じない場合が大半であるため、軽く挟むことにより物の把持を行うケースが多い。また、重力下での抗力を利用して“置く”ことにより物体のハンドリングを完了することができる。一方、宇宙ロボットの作業は、機器の単なるハンドリング作業においても、機器を取り損なって浮遊させてしまうことのないように6自由度を拘束する形で把持し、取付ポートへの固定を解除し、移設先へ再び固定するという作業が必要となる。したがって、6自由度の力覚情報をフィードバックして位置と姿勢の調整を行うことを必要とする接触作業が多い。このため、ETS-VIIのロボットでは、次の4種類の力覚制御機能を設け、アーム先端に対して任意の位置/方向に設定できる力覚制御座標(カルテシアン)系の各軸ごとに、これらの力覚制御を選択して設定できるように構成している。

- (1) 仮想コンプライアンス制御: ばね・マス・ダンパ機構を模擬した能動的柔らかさ制御
  - (2) カリミット制御: 作用力を一定以下に抑える制御
  - (3) アクティブリンプ制御: 能動的従動制御
  - (4) 力追従制御: 目標力に添った押付け動作制御
- 制御系は動作の安全性チェックのため、すべて位置制御を基本とする。アーム制御系の系統構成を図4に示す。

### 3.4 画像フィードバック機能

ロボットの主要な位置決め先には、アーム手先部のTVカメラ画像による位置合わせ確認用の標準化した指標(マーカ)を設けており、このマーカを対象として画像処理による計測を行い、アーム動作にフィードバックする。画像







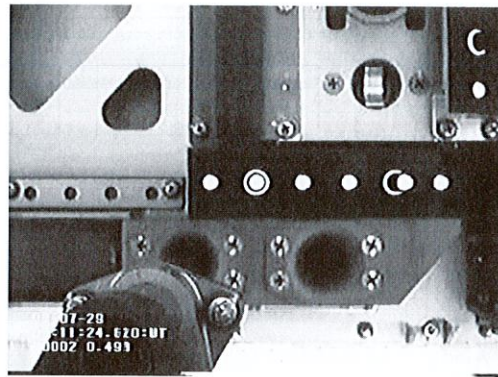
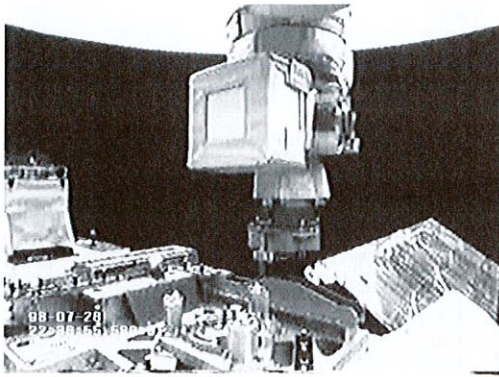
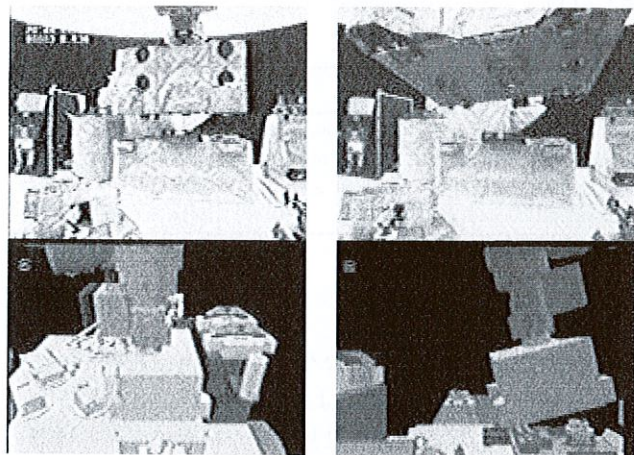


図6. ロボット(曲面做い)実験時の軌道上からのTV画像  
肩関節上の監視カメラ画像(左)と手先カメラ画像(右)を示す。

Images from onboard TV cameras



(a)軌道上交換ユニットの移動

(b)流体コネクタの目視点検

図7. 軌道上交換ユニットの点検実験時の画像例  
ユニット下面の流体コネクタ部の点検をしている状態を示す。

TV camera images of ORU inspection experiment

#### 4.6 衛星姿勢変動抑制実験

ロボットアームの動作反動により衛星の姿勢が大きくなりすぎると通信アンテナの指向がずれ、十分な通信ができない状態となる。ロボットアームの動作時に反動の角運動量を搭載計算機で演算し、姿勢制御計算機に送信しフィードフォワード制御を行うことにより、ロボットの動作反動による衛星の姿勢ずれを軽減する実験である。実験の結果、姿勢ずれを約1/3以下に軽減できることが確認できた。

#### 4.7 画像フィードバック実験

ロボットアームの手先カメラ画像の画像処理によりターゲットとの相対位置/姿勢を時々刻々に計測し、アーム動作にフィードバックして追従させ、所定の範囲内に入ったところで自動的に把持する実験を実施した。滑らかな動作で追従し、正常に把持できることが実証できた。これは、ドッキング機構をもたない通常の衛星に対する保守のために必要な、ロボットアームによる衛星捕獲に欠かせない技術である。また、高速接近、低速接近、把持といった一連のサブタスク作業を、自律安全回避機能も備えた形で一つのタスクレベルコマンドで実現した。これは、宇宙ロボッ

### 5 各機関の実験

通商産業省電子技術総合研究所、郵政省通信総合研究所、航空宇宙技術研究所の各国立研究所がロボット実験系におおのの実験装置を搭載し、ロボットアームを用いた各種実験(トラス機構の展開と収納など)を実施し、良好な結果が得られている。また、ESA や DLR との共同実験も成功裏に完了した。ロボットアームの汎(はん)用性によりマルチユーザーの要求に柔軟に対応できたと判断される。

### 6 あとがき

軌道上での衛星サービス、構造物組立て、月・惑星探査など、今後の宇宙開発において宇宙ロボットの果たす役割は大きいと考えられる。ETS-VIIのロボット実験により得られた知見、実証された技術を生かし、発展させ、安全で効率的な宇宙開発に努力を続けることが重要と考える。

### 文 献

- (1) 小田光茂. ETS-VIIロボット実験系の開発. 第42回宇宙科学技術連合講演会, 1998.



小田 光茂 ODA Mitsushige

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主任開発部員。人工衛星の姿勢制御系、宇宙ロボットの開発に従事。計測自動制御学会、日本ロボット学会、日本機械学会会員。  
National Space Development Agency of Japan



稲垣 哲哉 INAGAKI Tetsuya

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開発部員。人工衛星の姿勢制御系、宇宙ロボットの開発に従事。計測自動制御学会会員。  
National Space Development Agency of Japan



西田 信一郎 NISHIDA Shin'ichiro

情報・社会システム社 小向工場 宇宙メカトロニクス技術部参事。衛星機構制御系、宇宙ロボットの開発に従事。システム制御情報学会、日本機械学会会員。  
Komukai Operations