展 望

ETS-VII のミッション

Mission of ETS-VII

小 田 光 茂* *宇宙開発事業団

Mitsushige Oda* *National Space Development Agency of Japan

1. ETS-VII 計画

今後の宇宙活動ではランデブドッキング技術, および遠隔制御型の宇宙ロボット技術が不可欠であり, これらの技術の開発を目的に ETS-VII (技術試験衛星 VII 型, Engineering Test Satellite VII) は計画された. ETS-VII はランデブドッキングの目標となるターゲット衛星 (おりひめ) とターゲット衛星に対してランデブドッキングを行うチェイサ衛星 (ひこぼし) から構成されており, 両衛星は 1997 年 11 月 28 日に H-II ロケット 6 号機で打ち上げられた. 図 1 に H-II ロケットに搭載されて打ち上げを待つ ETS-VII を示す.

ETS-VII 計画は 1990 年に提案され, 1992 年より衛星搭載機器の開発が始まった [1]~[3]. チェイサとターゲットの 2 機の衛星, 衛星に搭載されたランデブドッキング/ロボット実験機器, 地上のランデブドッキング/ロボット実験運用設備等の開発, 衛星打上用ロケットの製作, ロケット/衛星の打ち上げ, および衛星の追跡管制を含む ETS-VII プロジェクトの総経費は 420 億円である.

本稿では ETS-VII のプロジェクトの概要, 実験計画, および主要な実験結果について示す. なお ETS-VII のロボット実験にかかわる搭載実験機器の詳細, 衛星姿勢と搭載ロボットアームの協調制御, 衛星搭載ロボットアームの地上からの遠隔制御等については本特集号の別稿に示す.

2. ETS-VII での実験計画

ETS-VII のミッションは, ランデブドッキング, および宇宙ロボット技術を開発し, 軌道上で実験を行うことであるが, それぞれの実験計画は以下の通りである.

2.1 ランデブドッキング技術実験

ETS-VII のランデブドッキング実験では以下の課題を FP0~FP6 と呼ばれる 6 種類の実験飛行の中で達成するよ

図 1 H-II ロケット上で打ち上げを待つ ETS-VII
(下部: チェイサ衛星, 上部: ターゲット衛星)

うに計画された [4].

- ランデブドッキング実験用各種機器 (GPS 受信機, ランデブレーダ, 近傍センサ, 加速度計, ドッキング機構等) の軌道上での機能性能の確認
- ETS-VII のチェイサ衛星とターゲット衛星との間の自動ランデブドッキング実験
- チェイサ衛星の地上からの遠隔操縦実験

ランデブドッキング技術はこれまでに米国, および旧ソ連 (現ロシア) で開発されているが, 現在, 両国が使用しているランデブドッキングの方法は双方の宇宙船の距離が離れている場合には自動での航法誘導制御が行われるものの, 両宇宙船が数 10 [m] 以内に接近してからは宇宙飛行士が航法誘導制御に介入する方式をとっている. 一方, ETS-VII のランデブドッキングは無人の人工衛星同士の自動ランデブドッキングであること, およびドッキング直前のチェイサ衛星のターゲット衛星に対する相対接近速度を 1 [cm/sec] と低く押さえ, ドッキング時の衝撃を押さええていることが特徴である. なお, ETS-VII ではランデブドッキング用機器の搭載位置等の制約からチェイサ衛星は

原稿受付 1999 年 7 月 30 日

キーワード: ETS-VII, Engineering Test Satellite, Orihime/Hikoboshi, Space Robot, Rendezvous Docking, Teleoperation

*〒 305-8505 つくば市千現 2-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

ターゲット衛星の前方から接近する方式を採用しているが、宇宙ステーションには下方からのランデブが要求されているため、宇宙ステーションへの接近を模擬した下方からのランデブ実験も予定されている。

2.2 ロボット実験

ETS-VIIのロボット実験は宇宙開発事業団(NASDA)、およびNASDA以外の研究機関により行われるが、NASDAのロボット実験では、衛星に搭載可能で地上から遠隔制御可能な宇宙ロボットの実現に必要な技術を修得することを目的に、以下の実験が計画された[5]。

- (a) 衛星搭載ロボット実験機器の軌道上での機能性能の評価
- (b) 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験
- (c) 衛星搭載ロボットアームの地上からの遠隔制御実験
- (d) 軌道上サービス基礎実験(衛星搭載機器の目視点検、軌道上交換ユニット(ORU)の交換、燃料補給模擬実験、ターゲット衛星操作実験等)
- (e) NASDAとDLR(ドイツ航空宇宙センタ)、およびESA(欧州宇宙機関)との共同ロボット実験

また、NASDA以外の機関によるロボット実験としては以下の実験が計画された[13]~[15]。

- 通商産業省：高機能ハンド技術実験
- 郵政省通信総合研究所：アンテナ結合機構基礎実験
- 科学技術庁航空宇宙技術研究所：トラス構造物遠隔操作実験

3. ETS-VIIの実験システム

3.1 実験システムの全体構成

ETS-VIIを使用したランデブドッキング/ロボット実験システムは図2に示すように、ETS-VIIチェイサ・ターゲット衛星、静止軌道上のデータ中継衛星を含む宇宙通信ネットワークシステム、地上の衛星追跡管制システム、およびランデブドッキング/ロボット実験運用設備から構成される。このうち、データ中継衛星としては1998年2月に打ち上げられた通信放送技術衛星(COMETS)を用いる予定だったが、COMETSの打ち上げに使用されたH-IIロケットの不調により、COMETSは静止軌道に到達することができず、データ中継衛星として利用できなくなったため、NASAのデータ中継追跡衛星(TDRS)を利用した。なお、COMETSは当初、ETS-VIIよりも半年前に打ち上げられる予定だったが、別の衛星の不具合との関連を調べるためにETS-VIIの打ち上げの1年前に急ぎよ、打ち上げがETS-VIIの後に延期された。ETS-VIIの実験運用にはデータ中継衛星が不可欠であったため、バックアップの通信回線としてNASAのTDRSを使用することとしてNASA経由の通信ネットワークを急遽整備したが、結果的に本バックアップ回線はCOMETSの打ち上げ失敗後も

図2 ETS-VIIの実験システムの全体構成

使用されることになった。つくづく巨大プロジェクトでは何が起きるか分からないことを思い知らされた一つの例である。また、本通信ネットワークは数多くの計算機のネットワークで構成されており、大半の回線が他の用途と共用であり、通信回線の容量、通信プロトコル等の制約により、往復で6~8秒程度の時間遅れが生じている。なお、時間遅れの変動は通信ネットワークの負荷の変動によるものである[7][8]。

3.2 ランデブドッキング実験システム

ETS-VIIのランデブドッキング実験では、軌道上でチェイサ衛星側のドッキング機構を開放して、ターゲット衛星をいったん分離し、チェイサ衛星の軌道高度を変えることによりターゲット衛星よりいったん遠ざかる。その後、チェイサ衛星は同衛星に搭載したランデブ用センサを使用してターゲット衛星との間の相対距離、相対速度を計測しながら、ターゲット衛星に接近し、最終的にはドッキング機構でターゲット衛星の捕獲を行う。チェイサ衛星とターゲット衛星の相対距離等の計測は、遠方域(500[m]以上)ではチェイサ/ターゲットの両衛星に搭載されたGPS受信機が受信したGPS衛星からの信号を利用したGPS相対航法により行われる。中距離(500[m]~2[m])域では、チェイサ衛星側から発したレーザ光がターゲット衛星上のリフレクタで反射して帰ってくるまでの時間、および方向から相対距離、方位を求めるランデブレダが使用される。近距離(2[m]以内)ではCCD素子によりターゲット衛星上のマーカを撮像し、画像計測により相対位置/姿勢を求める近傍センサが使用される。これらのセンサで求められた両衛星の相対的な位置関係から、ターゲット衛星に接近するための飛行軌道がチェイサ衛星に搭載された誘導制御計算機により自動的に求められ、目標とする軌道を飛行するようにガスジェットスラスタが駆動される。

一方、チェイサとターゲットの両衛星のドッキングは、

図3 ETS-VII 搭載ロボット実験機器

ターゲット衛星側に取り付けられたドッキング用ハンドルをチェイサ衛星側のラッチ機構で捕捉・固定する方式を採用している。チェイサ衛星側のラッチ機構は、チェイサ衛星側に搭載された近傍センサのデータからターゲット衛星側のドッキング用ハンドルがラッチ機構の捕獲可能領域に入ったかどうかを判断し、ラッチ機構の捕獲可能領域にドッキング用ハンドルが入ると、速やかにラッチ機構を閉じてターゲット衛星を捕獲するとともに、ラッチ機構を固く閉めることによりチェイサ衛星とターゲット衛星の剛結合を実現している。図5にドッキング機構の動作の様子を示す。なお、これまで米国、ロシアにより使用されてきたドッキング機構は剛構造の宇宙船同士がある程度の相対速度をもって接近し、宇宙船自体の運動エネルギーを利用して宇宙船同士のミスアライメントの除去／結合を行う方式であり、ある程度の衝撃の発生が避けられなかったが、ETS-VIIの場合、いずれの衛星もそれほど、剛な構造体ではなく、また大きな太陽電池パネルを有しており、衛星同士をぶつけ合う形のドッキングは適当でないため、ドッキング時にほとんど衝撃のでないドッキング方式を採用した[4]。実際にETS-VIIのチェイサ・ターゲット衛星がドッキングした際の衝撃は最大でも1[mG]程度と非常に微小であった。

3.3 ロボット実験システム

ETS-VIIのロボット実験機器の大半は図3、図4に示すようにETS-VIIチェイサ衛星に搭載されている。ロボットアームは全長が約2[m]で、6個の回転関節を有し、ロボットアーム先端のツール機構（エンドエフェクタ）上に手先カメラを、第一関節上に監視カメラを搭載している。また、ロボットアームの周囲にロボットアームで操作されるNASDA、および各機関のロボット実験機器が搭載されている。一部のロボット実験機器はターゲット衛星上に搭載されている。なお、ロボットアームを含むロボット実験機器は、両衛星の地球を向いた面に搭載されている。これは地球の大気層で乱反射した太陽光を照明に利用するためである。直射太陽光を照明に使用する場合、ダイナミックレンジの広いカメラでないと陰の部分の認識が困難となる。ロボットアームを含むNASDAの衛星搭載ロボット実験機器の詳細は本稿の次の特集記事による。

図4 衛星搭載カメラで撮像された衛星搭載実験機器
 ・写真左：ロボットアームで展開された状態のトラス構造物、中央は通産省の高機能ハンドを先端に取り付けたNASDAのロボットアーム、後方は高機能ハンド実験用の小型のロボットアーム（全長約0.5[m]）
 ・写真中央：ロボットアームで固定解除され、持ち上げられた軌道交換ユニット（質量：約20[kg]）
 ・写真右：タスクボード操作の専用ツールを取り付けたロボットアーム、下方はタスクボード、後方はアンテナ結合機構実験装置

4. ETS-VIIの実験運用結果

4.1 ランデブドッキング実験結果

ETS-VIIのランデブドッキング実験は、チェイサ衛星とターゲット衛星が結合された状態で打ち上げられることから、チェイサ／ターゲット衛星の分離・再ドッキングの実験から開始し、順次遠方まで離れてのランデブドッキング、および異常事象の発生を想定した危険回避機能の実験等を6回に分けて行うよう、計画された。最初のランデブドッキング実験は1998年7月7日の七夕に行われ、チェイサ衛星からターゲット衛星の分離、相対距離2[m]までの分離、再接近／ドッキングの実験が行われ、分離から24分後に両衛星は無事ドッキングに成功した[12]。図5にこのときの映像を示す。映像はチェイサ衛星に搭載されたCCDカメラで撮像されたものである。

第2回のランデブドッキング実験は1998年8月7日に開始された。当初予定ではチェイサ衛星はターゲット衛星を分離した後、ターゲット衛星から500[m]地点まで離れ、その後、再接近、ドッキングを4時間弱以内で行う予定であった。しかしながら、チェイサ衛星の姿勢・軌道制御に使用しているガスジェットスラスタの一部の動作が不安定となり、接近はたびたび中断された。ETS-VIIのランデブドッキング系は、ランデブドッキングの途中に異常が起きた場合には接近を中止し、衝突を回避する軌道に自動的に移行する機能が組み込まれており、異常が発生するたびに安全確保のため接近は中断された。チェイサ衛星には十分な姿勢軌道制御用の燃料が搭載されていたが、ターゲット衛星には限られた量の姿勢制御用燃料しか搭載されておらず、実験はターゲット衛星の残燃料を気にしながらの時間との勝負であった。この間、ETS-VIIの関係者はターゲット衛星の燃料消費を減らすために姿勢制御則を変更したり、チェイサ衛星がターゲット衛星に接近する方法をいろいろ

(a) 分離直前

(b) ドッキング直前

図5 ETS-VIIのドッキング機構

変更するなどの対応に迫られた。チェイサ衛星がターゲット衛星とドッキングできたのは8月27日の深夜だった。この実験飛行では、当初第2回から第5回までの実験飛行に分けて予定していた実験項目の大半（GPSを使用した航法誘導、危険回避のための飛行等）が実現できるという成果を得た。また、この飛行でランデブレーダやGPSを使用した航法誘導制御が非常に高い精度で行われていることも確認された。なお、ランデブドッキング実験の詳細は計測自動制御学会誌の特集号を参照して戴きたい。

ETS-VIIのランデブドッキング実験は当初6回の実験飛行で要求された技術課題の達成を図る予定であった。しかしながら、第2回の実験飛行の不具合対応の中で第3回目以降の実験飛行で予定していた大半の技術課題も併せて達成され、残っている技術課題は、宇宙ステーションへの接近を模擬したターゲット衛星下方からのランデブドッキング実験、地上からのチェイサ衛星の遠隔操縦実験、衝突回避マヌーバ等の異常事象対処実験となっている。これらの技術課題は本年10月に予定されている実験飛行で確認される予定である。

4.2 ロボット実験結果

2.2節に示したロボット実験の各課題に関する成果を以下にまとめる。

(1) 衛星搭載ロボット実験機器の機能性能の評価

本実験では、ロボットアームと各実験機器との位置関係のキャリブレーション、ロボットアームの制御精度の評価、コンプライアンス制御等の力覚制御性能の評価等が行われた。ロボットアームのキャリブレーションでは、ロボットアームで主要な実験機器を把持した際の関節角を設計図面上から計算される関節角と比較して、ロボット実験ペイロードの取り付け位置誤差や、ロボットアームの関節のバイアス誤差を除去することにより、ロボットアームは非常に高い制御精度（先端位置決め・繰り返し精度で1.5[mm]以内）を実現していることが確認された。また、宇宙ロボットとしてはETS-VII搭載ロボットアームで初めて採用されたロボットアームと相手物体との間に発生する力が指示された値となる「力追従制御機能」を含むロボットアームの力覚制御機能（コンプライアンス制御等）が正常に機能しており、実験機器の脱着等、相手機器との接触を伴う作業が容易に行えることを確認した。図6に直径18[mm]のペグを直径19[mm]の穴に挿入する peg-in-hole 実験を行った際のロボットアーム先端の動き（挿入方向[Z]、並進誤差除去方向[X]）を示す。なお、ペグの先端、および穴の周囲は丸く面取りがなされており、ロボットアームのコンプライアンス制御によりペグとペグ穴との間の並進（X）で5[mm]の初期誤差が除去されている。

また、ETS-VII搭載ロボットアームは、これまでに宇宙空間で使用されたどのロボットアームよりも長期間に渡って運用されており（打ち上げから1年半、ロボット実験を実施した日数は100日以上）、その間において特に性能の劣化は見られない。ロボットアーム以外の各種実験機器についても、いずれもミッション期間を通じて正常に機能している。ロボットアームの制御性能の評価は本特集号の別稿に示されている。

(2) 搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験

ETS-VIIはロボットアームを搭載した世界で初めての衛星であるが、人工衛星にロボットアームを搭載して作業を行わせる場合、ロボットアームの動作反動による衛星の姿勢変動をいかに防ぐかが課題となる。ロボットアームの遠隔制御等のための通信は一般にデータ中継衛星を介した通信により行われているため、衛星間通信用アンテナの指

図6 peg-in-hole 実験結果

向制御が不可欠である。そのため、ETS-VII では衛星本体の姿勢制御、アンテナの指向制御、およびロボットアームの制御の間の協調制御システムを構成し、ロボットアームの動作反力を角運動量として実時間で推定し衛星の姿勢制御系でフィードフォワード補償を行うとともに、衛星の姿勢変動分をアンテナの指向方向制御の際に補正している。また、ロボットアームの制御の際には、衛星に過大な動作反力を与えないように動作を制限する制御を行っている [9][10]。本協調制御システムについては本特集号の別稿に詳しく示した。

(3) 衛星搭載ロボットアームの遠隔制御実験

ETS-VII 搭載ロボットの遠隔制御は、NASDA の筑波宇宙センタから行われているが、ETS-VII との通信は図 2 に示すように、NASA のゴダード宇宙飛行センタ（メリーランド州）、TDRS 地上局（ニューメキシコ州）、静止軌道上のデータ中継追跡衛星（TDRS）を経由して行われており、往復で 6～8 秒の時間遅れが生じている。時間遅れは主として通信ネットワークを構成する計算機間の通信によるものでインターネット経由の通信で時間遅れが生じるのと同様である。また、時間遅れの変動は通信負荷の変動によるものと考えられている。

NASDA は ETS-VII 搭載ロボットアームの遠隔制御システムの設計に当たり、大きな通信時間遅れがある環境の中でも小人数のオペレータで、安全、確実、簡単に作業が行えることを目標に、電子手順書による自動遠隔操作、およびハンドコントローラを使用した遠隔手動操作により各種の実験作業を行うように構成した。電子手順書を使用した実験運用では、実験の作業手順をフローチャート形式の電子手順書に記述し、実験に先立って同電子手順書を実験運用設備に内蔵された衛星搭載ロボット系シミュレータに対して実行することにより手順書の検証を行っている。実際の実験運用時には、必要な電子手順書を呼び出すことにより必要な指令は自動的に送出され、オペレータはその実行状態を監視するだけでよいようになっており、いわゆる Supervised Control の技術が使用されている。また、一度、作成・検証・使用された電子手順書は、別の作業手順を作成されるときにも利用され、短期間での電子手順書の作成を可能にしている。

一方、目視検査等、自動化が困難な作業ではハンドコントローラを使用した遠隔手動操作が行われる。この場合も、通信時間遅れによる操作性の劣化を補うために、ロボットアームの動作状態を予測的に表示する等の対策が取られている。また、ロボットアームと接触している相手機器との間に発生する力はコンプライアンス制御等の力覚制御機能により搭載ロボット系でローカルに制御されており、地上のオペレータがロボットアームの発生力を常時モニタする必要は必ずしもない。これらの技術のおかげで、ロボット

図 7 NASDA のロボット実験運用設備（前列がオペレータ、後列は実験運用統括者）

図 8 電子手順書を使用したロボット実験の様子（大半の作業はマウス操作で行われる）

アームを使用した作業は、短期間の準備、および小人数のオペレータで行えるようになっている。図 7 に NASDA のロボット実験運用設備を、図 8 に電子手順書を使用した作業の様子を示す。また、NASDA のロボット実験運用設備は、NASDA 以外の機関のロボット実験運用設備からの指令を受け取り、実時間でチェックした上で衛星に転送する機能や、衛星からのテレメトリデータ・画像データから外部機関の実験に必要な部分を抽出して外部機関のロボット実験運用設備に転送する機能をも有しており、NASDA 以外の機関によるロボット実験は筑波宇宙センタに設置された各機関のロボット実験運用設備から ETS-VII 搭載ロボットアームを遠隔制御することにより行われた [7][8]。

なお、大学等の実験室におけるロボットの遠隔操作実験では多自由度のマスタアームが使用されることが多いが、ETS-VII では地上試験用テストベッドを使用した試験 [11] により、動作速度がそれほど速くない衛星搭載ロボットの場、ロボットアーム先端の並進速度、および姿勢変更速度を独立に与える 2×3 方式のジョイスティックが使いやすいことを確認しており、NASDA の ETS-VII ロボット実験運用設備では図 9 に示すジョイスティックを使用している。ただし、遠隔操作中に何らかの異常で通信回線が遮断

図9 若田飛行士(左端)による遠隔操作実験の様子(左手:並進制御, 右手:姿勢制御. 前方下部は衛星からの映像表示モニター)

された場合においても安全が確保されるように, 衛星搭載ロボットへの指令は, ハンドコントローラからの速度指令を積分したロボットアーム先端の位置・姿勢角指令として250[msec]ごとに送信している. 衛星に搭載されたロボット制御用計算機は本指令からロボットアームの動作軌道, および同軌道を実現するための関節角を求めて, ロボットアームの各関節の駆動制御を行っている. ETS-VII 搭載ロボットアームの遠隔操作実験の評価については本特集号の若田飛行士による解説記事を参考にしていただきたい.

(4) 軌道上サービス基礎実験結果

(a) 衛星搭載機器の目視点検

ロボットアームの先端, および第一関節上には CCD カメラが搭載されており, 同カメラからの映像は最大で5[frame/s]で地上に伝送される. 衛星搭載機器の目視検査は, この映像を見ながら, 搭載ロボットアームを遠隔操作することにより行われたが, ETS-VII 搭載ロボットの遠隔操作システムがロボットの専門家以外でも容易に操作できるように設計されていたこともあって, 目視検査作業は非常に容易であった. このことから遠隔操作ロボットを使用した衛星搭載機器の目視検査が今後の軌道上作業として十分利用可能であることが確認されたとと言える.

(b) ロボットアームによる軌道上交換ユニットの操作

ETS-VII に搭載された軌道上交換ユニット (ORU) 本体は電子レンジ程度の大きさ・質量 (500 [mm] × 400 [mm] × 300 [mm], 約 20 [kg]) で, ロボットアーム先端のツールに内蔵されたソケットレンチにより ORU 内部の固定機構を動作させ, 固定解除/固定が行われる. 図10にロボットアームによる軌道上交換ユニットの操作の様子を示す. また, 本 ORU, および下部の ORU ポートの内部には推薬タンク, バルブ, 配管が組み込まれており, 両者は流体コネクタ, 電気コネクタで接続されている. 流体コネクタ,

図10 ロボットアームによる軌道上交換ユニット (ORU) の操作, および推薬補給模擬実験の様子

電気コネクタは, ORU の脱着の際, ロボットアーム側からのトルク供給により脱着されるようになっている. 1998 年 10 月 29 日に本実験装置を使用した推薬補給実験が行われ, 模擬推薬 (ヒドラジンと比重, 沸点, 凝固点等の特性が似ている水を使用) の移送実験が行われた [16]. 軌道上での推薬移送は世界的に見てもロシアのみが保有する技術 (宇宙ステーション “ミール” への燃料補給に使用) であり, 今回の実験 (ORU 交換, 燃料補給模擬実験) は無人の人工衛星上で行ったものとしては世界で初めてのものである.

(c) 交換可能なツールを使用した作業実験

ETS-VII 搭載ロボットアームの先端に取り付けられているツール機構部 (エンドエフェクタ) は 3 対の指, およびラッチ機構を有しており, 実験機器に取り付けられている把持用の金具 (グラブルフィクスチャ) とロボットアームの間に多少のミスアライメントがあってもグラブルフィクスチャを把持でき, いったん把持した後は大きな外力が加わっても容易には把持した機器を離さないような構造となっている. しかしながら, 本ツール機構はグラブルフィクスチャが取り付けられない小型の機器や浮遊している機器・衛星等を把持/操作するには適していない. そのため, ETS-VII のロボットアームには操作対象に応じたツールをツール機構部の先端に取り付けて作業を行うことが可能になっている. 図11にタスクボード上の小型部品を操作するためのタスクボード操作ツールを取り付けたロボットアームで小型の部品 (鎖でつながれた小型の金属球) を操作している様子を示す. 本ツールにはペグ (棒) も取り付けられており, スイッチやスライドハンドルの操作, Peg-in-hole 実験等に使用される. また, ロボットアーム

図 11 タスクボード上の小型部品の操作（鎖でつながれたピンポン玉程度の金属球の取り出し）

図 12 ロボットアームによるターゲット衛星操作

でターゲット衛星を把持操作する際には、大きな 2 本指を有するターゲット衛星操作ツールをロボットアームの先端に取り付け、本ツールでターゲット衛星上のハンドルバーを把持する [6]。図 12 に本ツールを使用してターゲット衛星を把持し移動操作している様子を示す。

また、1999 年 9 月には追加のロボット実験の一つとして、ロボットアームによるターゲット衛星の捕獲実験を実施し、衛星搭載計算機による実時間画像処理を利用してロボットアームをターゲット衛星の動きに追従させ、捕獲することに成功している。

5. ま と め

技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) は、1997 年 11 月 28 日に打ち上げられ、ランデブドッキング技術実験、および宇宙ロボット技術実験が行われた。本稿では、ETS-VII の実験計画、および主要な実験成果を紹介した。なお、ETS-VII の実験運用期間は当初、1.5 年間で予定されていたが、衛星状態が良好なため、その後も 1999 年 11 月末までの予定で実験運用が継続され、追加の実験が行われている。

参 考 文 献

- [1] 小田：“ETS-VII のミッションの概要”，宇宙開発事業団技術報告，NASDA-TMR-97002，1997。
- [2] T. Iwata and M. Oda, et. al.: “Development of the second

generation space robot,” The 40th International Astronautical Congress, IAF-89-051, 1989.

- [3] M. Oda, et al.: “ETS-VII, the world first telerobotics satellite (Mission and its design concept)”, Proc. of the 2nd International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS'92), pp.307-318, 1992.
- [4] M. Oda, I. Kawano and F. Yamagata: “ETS-VII (Engineering Test Satellite VII) - a Rendezvous Docking and Space Robot Technology Experiment Satellite,” 46th International Astronautical Congress, IAF-95-U201, 1995.
- [5] M. Oda, et al.: “ETS-VII, Space Robot In-Orbit Experiment Satellite,” Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.739-744, 1996.
- [6] M. Oda, et al.: “Development of the EVA End Effector, Grapple Fixtures and Tools for the Satellite-Mounted Robot System,” Proc. of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96), pp.1536-1543, 1996.
- [7] M. Oda: “System engineering approach in designing teleoperation system of the ETS-VII robot experiment system,” Proc. of 1997 IEEE International Conf. on Robotics and Automation (ICRA'97), pp.3054-3061, 1997.
- [8] M. Oda and T. Doi: “Teleoperation system of ETS-VII robot experiment system,” Proc. of 1997 IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS'97), pp.1644-1650, 1997.
- [9] M. Oda: “Motion control of the satellite mounted robot arm which assures satellite attitude stability,” Acta Astronautica vol.4, no.11, pp.739-750, 1997.
- [10] 小田：“衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御—ロボットアーム動作時の衛星の姿勢安定の保証—”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.4, pp.590-600, 1997.
- [11] 小田：“衛星搭載ロボットアームの遠隔操作模擬実験—通信時間遅れや通信容量制限等の環境を模擬した実験—”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.4, pp.581-589, 1997.
- [12] I. Kawano et. al.: “First result of autonomous rendezvous docking experiments on NASDA's ETS-VII satellite,” Proc. of 49th International Astronautical Congress, IAF-98-A309, 1998.
- [13] K. Machida, H. Nishida and K. Akita: “Precise Telerobotic System for Space Experiment on ETS-VII,” 49th Int. Astronautical Congress, IAF-98-U505, 1998.
- [14] K. Matsumoto, et al.: “Teleoperation control of ETS-7 robot arm for on-orbit truss construction,” Proc. of 5th int. symp. on artificial intelligence, robotics and automation in space (i-SAIRAS'99), pp.313-318, 1999.
- [15] S. Kimura and S. Tsuchiya: “Antenna-assembly experiments using ETS-VII”, Proc. of 5th int. symp. on artificial intelligence, robotics and automation in space (i-SAIRAS'99), pp.307-3312, 1999.
- [16] 小田，稲垣 他：“ETS-VII にける軌道上サービス基礎実験”，第 15 回宇宙ステーション講演会予稿集，pp.3-4, 1999.

小田光茂 (Mitsushige Oda)

1951 年 10 月 4 日生。1975 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1977 年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年宇宙開発事業団入社。人工衛星の姿勢制御技術の研究開発に従事。1987～1988 年英国ラザフォードアップルトン研究所客員研究員。帰国後宇宙ロボットの研究、および技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) プロジェクトに従事。1996 年工学博士 (東京工業大学)。計測自動制御学会、日本機械学会等の会員。1999 年日本機械学会宇宙工学部門業績賞、1999 年日本ロボット学会論文賞。(日本ロボット学会正会員)