

宇宙ロボティクス技術

Space Robotics Technologies

西田 信一郎
S. Nishida

川島 教嗣
N. Kawashima

久保 智彰
T. Kubo

特集
II

宇宙ロボットシステムは、真空潤滑機構、高速搭載計算機、センサなどの宇宙用ハードウェア技術、および制御、画像処理、シミュレーション、高速演算処理などのソフトウェア・システム技術などの広い分野の技術を適用して構築されている。当社が主担当で開発を進めているマニピュレータ飛行試験(MFD)、技術試験衛星VII型(ETS-VII)、日本実験モジュールマニピュレータ(JEMRMS)などの宇宙ロボット関連プロジェクトは、開発フェーズが進み、打上げに向けて仕上げの段階に入っている。

ここでは、各宇宙ロボットプロジェクトに適用されている技術を中心とした技術動向および宇宙ロボットの将来展望について述べる。

Many space hardware technologies such as tribology, onboard computers and sensors are applied to space robot systems. Space robot systems also incorporate system and software technologies such as image processing, simulation, and high-speed calculation. The MFD, ETS-VII, and JEMRMS space robot projects, for which Toshiba is a prime contractor, are in the flight model testing phase. This paper introduces the trends and status of technologies applied to these projects and describes Toshiba's future view of space robots.

1 まえがき

宇宙飛行士の若田さんがスペースシャトルのマニピュレータを操作して日本の人工衛星(SFU)の捕獲・回収に成功したミッションは記憶に新しい。また、スペースシャトルでマニピュレータの先端部に乗った宇宙飛行士がスペーステレスコープ(HST)の不具合機器を交換・修理し、それでピンぼけの画像を送っていたHSTが見事にシャープな画像を送るようになったという事例もある。このように、スペースシャトルでは軌道上での衛星修理や回収が技術的に確立された作業として淡々と行われ、マニピュレータが重要な場面で活躍している。

当社では、わが国で開発進行中の三つの宇宙ロボットプロジェクトを担当しており、宇宙ロボット開発に注力している。これらに適用されている技術および発展性・将来展望について紹介する。

2 宇宙ロボットのニーズ

軌道上での衛星の修理は、宇宙飛行士の船外活動(EVA)により行われてきた。しかし、EVAは宇宙服を着込んで命綱を頼りに行うものであり、危険を伴う。また、高い信頼性に守られているが有人のフライト自身、危険がないとは言えない。したがって、衛星の修理、機器交換、実験支援、宇宙ステーション組立などの作業は、宇宙ロボット船外作

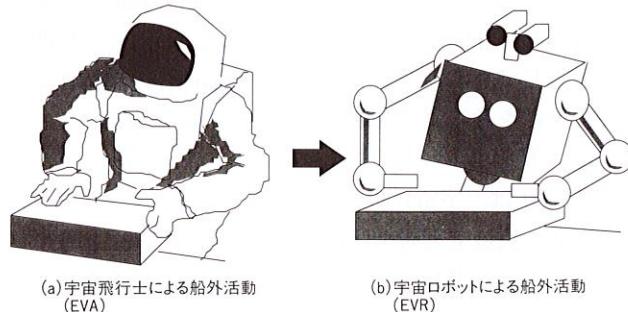


図1. 船外活動とロボット作業のアナロジー 宇宙ステーション組立作業などの人間の船外作業を宇宙ロボットに代替させる。

Analogy between EVA and robot activity

業(EVR)により無人化、自動化することが望ましい(図1)。また、故障した衛星においては、近づいてドッキングすることが困難なケースが多い。このようなケースでは、ロボットアームによる衛星捕獲機能が活躍する。浮遊衛星に対して、ドッキング装置がなくともロボットでつかめる部位(取っ手)があれば、若田さんが実証したようにロボットアームにより容易に捕まえることができる。

軌道上の無重力環境に長期間滞在すると、人間の身体には骨が弱体化するなどの悪影響が出る。したがって、軌道上で材料実験や生物化学実験を長期間行うためにはロボットなどによる無人化および自動化が欠かせない。並行して

各種の複数の実験を進めるには、ロボットの汎用性に依存してタイムシェアリングに実験支援を行うのが効率的である。

3 宇宙ロボット開発の現状

わが国では、次の三つの宇宙ロボット関連プロジェクトが進行しており、うち二つは今年中に軌道上へ打ち上げられ、実験が行われる予定である。

(1) マニピュレータ飛行試験 (MFD)

(2) 技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII)

(3) 日本実験モジュールマニピュレータ (JEMRMS)

以下、これらに適用されている技術について記述する。

3.1 MFD

軌道上でのマニピュレータの操作性などの検証を目的として JEMRMS の小型アーム (全長 1.3 m) と同形のロボットアームを用いて実施される MFD は、1997 年夏の打上げに向け、ライトモデルの地上での最終試験フェーズに移行している。

ロボットアームは、作業対象の機器とともにスペースシャトルの荷物室に搭載され、これを主としてスペースシャトルの与圧室内からテレビモニタを見ながら宇宙飛行士が操作する。スペースシャトルの限られた飛行時間内で 16 時間の時間を利用して、軌道上交換ユニット (ORU) や開閉扉を対象としてロボットアームによる機器操作の制御性能評価や作業性を評価する実験が行われる予定である。

3.2 ETS-VII

ETS-VII は、宇宙ロボット技術、ランデブドッキング技術の開発、軌道上実験を目的とした衛星で、1997 年度に打上げの予定で、現在ライトモデルの試験が進められている (図 2)。

軌道上でチェイサ衛星とターゲット衛星の二つの衛星に分離可能な ETS-VII のチェイサ衛星の地球指向面パネル上に約 2 m 長のロボットアームが搭載される。地球指向面パネル上には、ロボットの作業対象となる各種の機器が搭載され、ORU の交換やトラス構造物の操作、スライドハンドルの操作、浮遊物の捕獲、ターゲット衛星の操作などの各種の作業実験をロボットアームの自動動作や地上からの遠隔操作により行う。実験の作業性や操作性の確認および操作訓練への使用を目的として、地上用動作ロボットモデルである ETS-VII ロボットテストベッド (図 3) が構築され、各種の試験や訓練に使用されている。

なお、ETS-VII ではパネル上の機器操作だけでなく、浮遊したターゲット衛星のロボットアームによる捕獲実験も利用実験の一つとして検討されている。

3.3 JEMRMS

JEMRMS は、日・欧・露の共同で構築・実験される米国

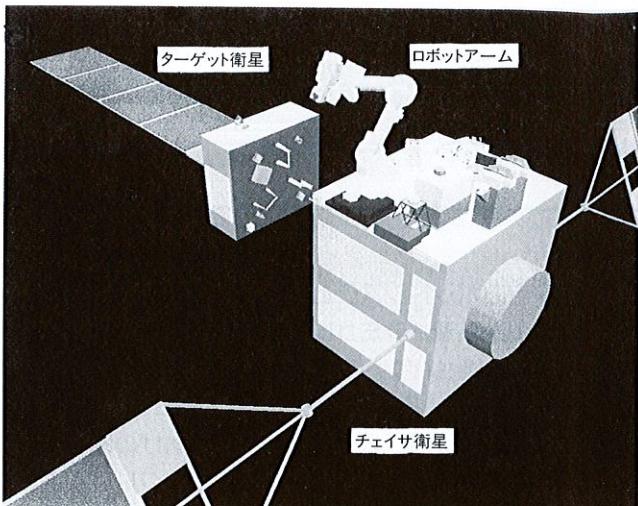
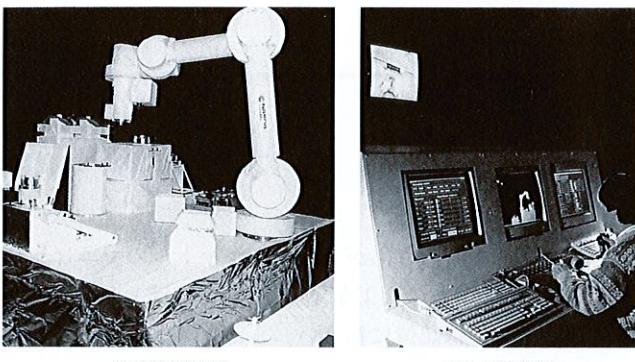


図 2. ETS-VII の外観 チェイサ衛星、ターゲット衛星のランデブ中の形態を示す。

Rendezvous of ETS-VII target and chaser spacecraft



搭載系模擬部

地上系模擬部

図 3. ETS-VII ロボットテストベッド 搭載系模擬部と地上系模擬部から構成され、地上で動作模擬ができる。(写真は NASDA の提供による)

Test bed of ETS-VII robot subsystem

の宇宙ステーションに取り付けられる日本実験モジュール (JEM) において実験機器の運搬・交換や実験支援作業などをを行うリモートマニピュレータシステムである。

JEMRMS は、主として実験モジュールや大型機器の運搬を行う全長約 10 m の親アームと、その先に取り付けて ORU 交換などの作業を行う全長約 1.3 m の子アームから構成され、与圧モジュール内の専用の操作卓から操作される。

JEMRMS は、2001 年の打上げに向けてライトモデルの製作フェーズに移行している。これまでの開発で、機能モデル、エンジニアリングモデル (図 4) などの各種のモデルが製作され、試験・評価に供されている。

親アームのエンジニアリングモデルは、振動試験、熱真空試験などの各種の耐環境性試験に供され、さらに大型の定盤上にエアペアリングで浮上させて地上の 1 G 重力の影

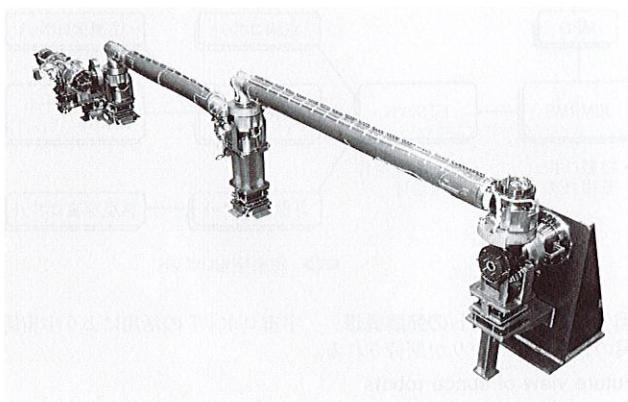


図4. JEMRMS 親アームのエンジニアリングモデル フライトモデルと同等の構成で二次元試験に供されている。
Engineering model of JEMRMS main arm

響を極力抑えた状態で二次元動作させ、制御機能や制御性能などの試験に供されている。

4 宇宙ロボットのキー技術

ロケットやスペースシャトルで打ち上げられ、軌道上の無重力環境で機能する宇宙ロボットは、地上用のロボットと比較して特に次の各事項を考慮して構成されている。

- (1) 軽量化 打上げ制約、打上げコスト削減
- (2) 耐環境性 打上げ時振動、軌道上極限環境
- (3) 大質量物取扱い ロボットより質量大の操作対象物
- (4) 浮遊による反動 飛行する衛星上のロボット
- (5) 固定物取扱い 誤放出回避のため物は必ず固定する

これらの事項は、設計に対して相反する要求となる事項を多く含み、ハードウェア、ソフトウェアおよびユーザ仕様について詳細な解析に基づくバランスよい配分、設計解の絞込みを要求する。

以下では、設計成立のキーとなる技術を紹介する。

4.1 ロボット機構

宇宙空間は 10^{-5} [Pa] 以下の超高真空となる場合があり、このような雰囲気では通常地上で用いられる潤滑油は蒸発してしまい、潤滑不良が生ずる。また、蒸発した潤滑油が周辺の光学機器などに再凝縮して光学特性を劣化させる原因となりうる。

通常の潤滑油やグリースは、 -60°C 以下では固化してしまい、良好な潤滑特性を示すとはいがたく、固体潤滑剤が多く用いられる。固体潤滑剤としては、金、銀、鉛などの柔らかい金属、二硫化モリブデンなどの摩擦係数がきわめて低い層状結晶構造をもつカルコゲン物質、およびポリ

テトラフロロエチレン (PTFE) などの高分子材料が用いられる。これらは広い温度範囲で一定の潤滑性能を示すとともに、きわめて蒸発しにくく、潤滑剤の枯渇や周囲機器の汚染といった問題を起こしにくい。固体潤滑剤は、機構要素のしゅう動部表面に薄い膜として付着させて使用するが、潤滑する機構要素によって最適な固体潤滑剤や使用方法が採用される。

ETS-VII ロボットアームの関節部として試作した機構の構成を図5に示す。関節の構成要素はころがり軸受、ハーモニックドライブ減速機、モータ、サーボセンサなどである。ころがり軸受では、ボールとレース表面に二硫化モリブデン薄膜をスパッタリング法により形成して潤滑を行う。併せて、PTFE系の複合材料のボール保持器を採用し、ボール表面に PTFE が長期間にわたり供給されるようくふうがなされている⁽²⁾。ハーモニックドライブには、表面硬化処理および金メッキなどを施して潤滑している。

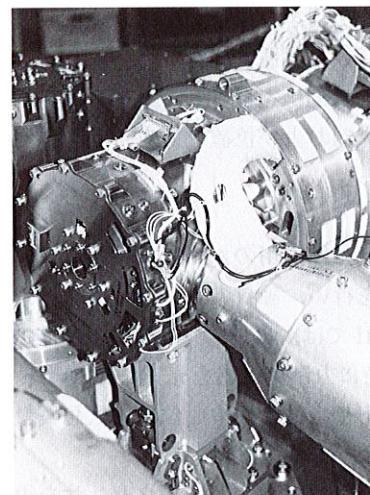


図5. ETS-VII ロボットアームの関節機構 最大トルク 40 Nm。先端コネクタ用信号ラインなどのハーネスは曝露しないようにスパイラル巻して収納している。
Joint mechanism of ETS-VII robot arm

4.2 エレクトロニクス

ETS-VII のロボット制御搭載計算機を図6に示す。この搭載計算機は、通信処理部や画像処理部も含めたマルチCPU構成の計算機であり、各ボード間の接続には宇宙用電子機器としては珍しいマザーボード方式を採用している。機能部ごとに、異なる処理周期に対しマルチタスク処理を行うソフトウェアを開発・搭載し、複雑なロボット制御処理をこなす。

搭載計算機やモータ駆動回路は、耐放射線性、耐真空性、広い耐温度性能を備えた部品を用いて構成される。このため、使用される部品は地上用民生部品と比較して集積度や性能において一世代遅れたものが主だが、信頼性確保に重点を置いた厳しい設計基準の制約下で高集積化、軽量化に努力が払われている。

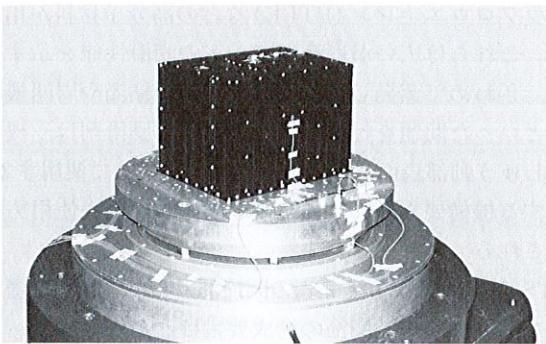


図6. ETS-VII ロボット搭載計算機 加振機に搭載し振動試験に供している状況を示す。

Robot mission onboard computer of ETS-VII

4.3 画像処理

温度変化による作業対象の位置変化への対応や浮遊衛星の追従・捕獲のためには、対象物の画像計測に基づく画像フィードバック制御が有効である。ETS-VIIでは標準のマーク付き指標体を設定し、これを対象として相対位置・姿勢の画像計測を軌道上で行い、位置決めにフィードバックしている。汎用的な作業の自動化を目指してマーク付き指標体を用いずに対象物の識別および位置計測を行う画像処理方法の開発を進めている。

4.4 制御システム

宇宙ロボットにおいては、地上用のロボット言語に宇宙用に機能付加・アレンジを行い、独自のロボット言語体系を構築している。ETS-VIIでは、自動、マニュアル操作の両制御モードを用意し、特に力制御機能を充実させている。力制御では把持対象物に応じて従動性中心位置や仮想質量パラメータを選定できるように構成している。

出力軸部に、緩衝・減衰用の弾性部とトルクセンサを設けたコンプライアンス関節⁽³⁾が汎用的な力制御に有効と考え、開発を進めている。

浮遊衛星の捕獲は、ロボットアームの重要なミッションの一つである。捕獲動作時には、アーム動作の反動の衛星姿勢制御やアンテナ指向制御、太陽電池パドル振動との干渉が問題となる。アーム動作の反動による衛星姿勢制御の過渡的なずれ量を低減するため、アーム動作の衛星重心回りの運動量を算出して時々刻々姿勢制御系に信号伝送し、姿勢制御系でフィードフォワード制御を行う方式が採られている。

5 宇宙ロボットの将来構想

宇宙ロボットの発展構想を図7に示す。各種プロジェクトで培われた技術をベースに多様な用途に応じた専用化、最適化が進められると同時に、電子回路、機構要素の高集

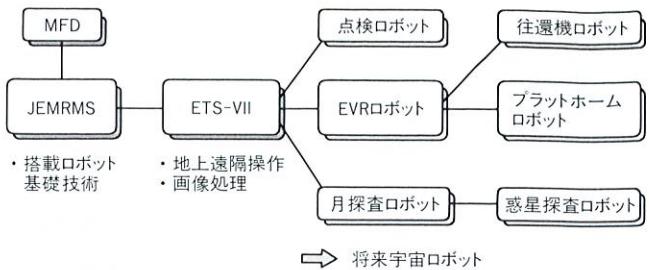


図7. 宇宙ロボットの発展構想 宇宙ロボットの活用により宇宙開発の自由度の広がりが期待される。

Future view of space robots

積化、軽量化により所要リソースの低減が図られ、各種の宇宙開発の場で汎用的に活用されることが見込まれる。

6 あとがき

当社が担当している宇宙ロボット関連プロジェクトの技術を中心に、宇宙ロボット技術の概要を紹介した。安全で効率的な宇宙開発の推進において、今後宇宙ロボットの果たす役割は大きいと考えられる。ロボット技術を得意とするわが国は、今後ともこの分野でリーディングシップをとり、衛星サービスや月・惑星探査などへの活用を進めていくことが望まれる。当社は、各プロジェクトでこれまでに培った技術を発展させ、宇宙開発に貢献する宇宙ロボットの開発に努力を続けていく所存である。

文 献

- (1) 川島教嗣, 他 : 宇宙用機器とトライボロジー, 東芝レビュー, 44, 11, pp.856-858 (1989)
- (2) T. Kawamura, et. al: "Study of Bearings for Space Use", Proc. 4th European Symposium on 'Space Mechanisms and Tribology', pp.101-107 (1990)
- (3) S. Nishida, et. al : Robot Arm System for Automatic Satellite Capture and Berthing, Proc. of i-SAIRAS '94, (1994)



西田 信一郎 Shin'ichiro Nishida

小向工場宇宙プログラム開発部副参事。
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 Works



川島 教嗣 Noritsugu Kawashima

小向工場宇宙プログラム開発部主幹。
衛星機構系、宇宙ロボットの開発に従事。日本機械学会、日本トライボロジー学会会員。
Komukai Works



久保 智彰 Tomoaki Kubo

生産技術研究所生産システム技術研究部主任研究員。
ロボット、検査画像処理システムの開発に従事。
Manufacturing Engineering Research Center