

宇宙ステーション日本実験モジュール用マニピュレータ JEMRMS

Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS)

松枝 達夫
MATSUEDA Tatsuo

佐藤 直樹
SATO Naoki

桑尾 文博
KUWAO Fumihiro

本橋 聖一
MOTOHASHI Shoichi

国際宇宙ステーション取付け型日本実験モジュール (JEM) に取り付けられるマニピュレータ (RMS) の開発を行っている。JEMRMS は、親アーム/子アームという大小二つのロボットアームをもつユニークなロボティクスシステムである。JEMRMS は、1997 年に打ち上げられた米国航空宇宙局 (NASA) のスペースシャトル (STS) で実験を行ったマニピュレータ飛行実証試験および技術試験衛星 VII 型での宇宙ロボットの飛行検証試験に引き続き、JEM での実験、保全作業支援に使用する宇宙での実用ロボットとして 2001~2 年にかけて、3 回に分けて STS で打ち上げられる。

現在、開発モデル (EM) による開発試験を終了し基本的な性能に問題のないことを確認して、その後フライトモデルの製作を進めている。

The Japanese experiment module remote manipulator system (JEMRMS) has been developed. This is a unique robotic system which consists of two robotic arms (the main arm and the small fine arm) controlled by a robotics workstation. The manipulator flight demonstration launched by NASA space shuttle (STS) in 1997 was successfully completed, and the Engineering Test Satellite VII (ETS-7) launched by H-II rocket in 1997 has been conducting space robotics experiments.

After these experimental missions, the Japanese experiment module (JEM) will be launched by three STS flights during the time frame of 2001 to 2002. Development tests using the JEMRMS engineering model have been completed and its basic performance has been verified. The flight model is currently under development.

1 まえがき

JEMRMS は、国際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) の構成要素の一つであるマニピュレータで、曝(ばく)露部/補給部曝露区上の実験ペイロード(搭載機器)の交換作業や保全作業支援を行うシステムである。JEMRMS は、比較的大きな対象物をハンドリングするための全長約 10 m の親アームおよびその先端に取り付けられ精密な作業を行う約 2 m の子アームという二つのロボットアームと、それを与圧部内の宇宙飛行士が操作するためのコンソールから構成される。図 1 に JEM を示す。

JEMRMS はわが国三番目のフライトを行うマニピュレータシステムである。97 年の夏に STS で実験を行ったマニピュレータ飛行実証試験では、子アーム相当の大きさのアームを使って JEMRMS の機能の一部を実証した。また、97 年末に打ち上げられた ETS-VII では地上からの遠隔操作を含めた宇宙用ロボットの基礎技術を蓄積するための各種実験が行われている。

JEMRMS はこれら実験段階のロボットシステムに引き続いて、JEM での曝露ペイロード運用、保全運用の支援などシステム機器としての運用が要求される。また、軌道上で 10 年間の運用を行うため、自分自身が故障に対応した保全性をもつこと、軌道上での宇宙飛行士の長期にわたる操作

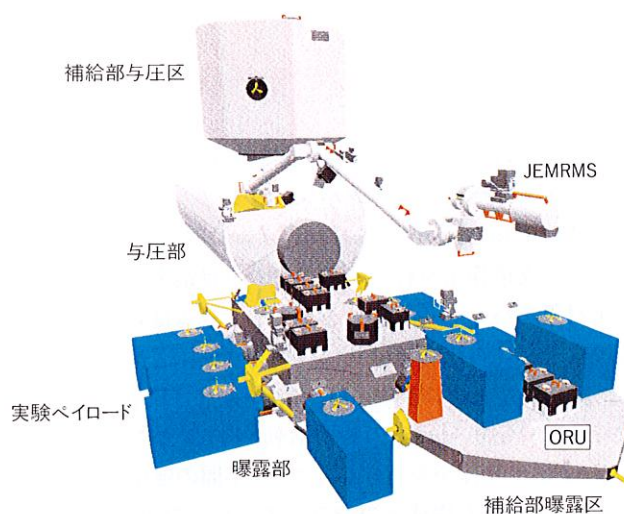


図 1. JEM の構成 JEM は与圧部、曝露部、補給部(与圧区、曝露区)、RMS の四つのシステムから構成される。
Configuration of JEM

運用に対応した負荷の少ないヒューマンマシン インタフェース (HMI) が要求される。

開発フェーズでは、アームの機能性能を検証する試験だけでなく保全性、操作性の評価を実施しており、その内容を含め JEMRMS の開発状況について述べる。

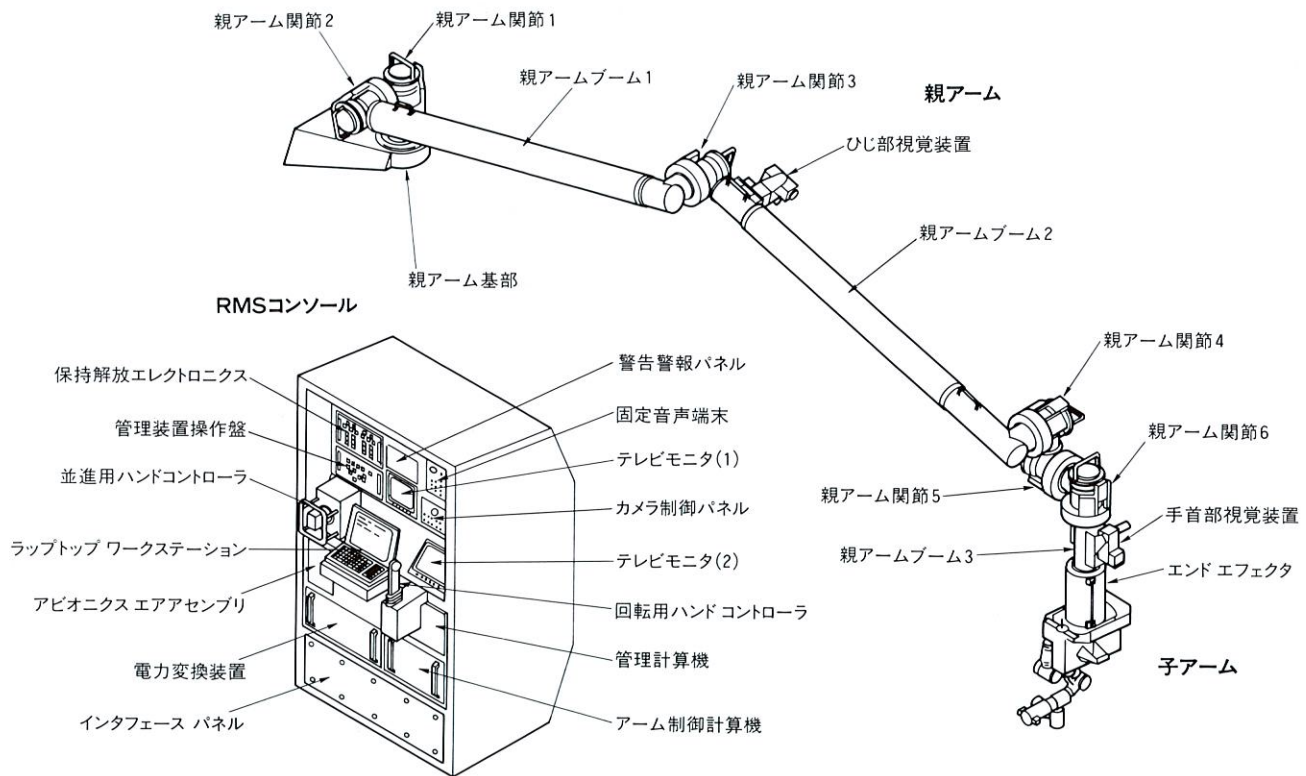


図2. JEMRMS の構成 JEMRMS は親アーム、子アームの二つのアームを与圧室内から RMS コンソールを使って運用する。
Configuration of JEMRMS

2 JEMRMS の概要

2.1 ミッション

JEMRMS は、与圧部内の搭乗員の遠隔操作で JEM 構成要素、曝露部ペイロードのハンドリング、曝露部の軌道上交換装置 (ORU) の保全、ミッション ORU の交換などのミッション支援作業を行う。親アームでは最大 7 トンまでの作業対象をハンドリングできる。子アームは親アームの先端に取り付けられて運用され、コンプライアンス機能により、細密な作業ができる。ミッション期間は軌道上 10 年で、故障時には宇宙飛行士の船内活動 (IVA) または船外活動 (EVA) により保全を行うことで 10 年間の運用ができる。

2.2 システム構成/コンフィギュレーション

主要なアセンブリは、親アーム、子アームおよび RMS コンソールの三つで、その構成・形態を図 2 に示す。また、これらの機器の打上げ/回収、軌道上保管などを支援する飛行支援装置 (FSE)、軌道上支援装置 (OSE) などをもつ。

2.3 システム性能

JEMRMS の主要性能を表 1 に示す。

表 1. JEMRMS の主要仕様

Performance of JEMRMS

項目	親アーム	子アーム
自由度	6	6
長さ (m)	約 10	約 2
把持質量 (kg)	最大 7,000	最大 300
位置決め精度 (mm)	並進 ±50	並進 ±10
(°)	回転 ±1	回転 ±1
(mm/s)	60 (P/L: 600 kg 以下)	50 (P/L: 80 kg 以下)
先端速度 (mm/s)	30 (P/L: 3,000 kg 以下)	25 (P/L: 300 kg 以下)
(mm/s)	20 (P/L: 7,000 kg 以下)	
最大先端力 (N)	30 以上	30 以上

P/L: ペイロード

コンソールのアセンブリレベルでの開発試験、およびそれらを組み合わせたシステムレベルの開発試験を行った。

試験フローを図 3 に示す。親アームについては、マネピュレータとしての機能性能を確認するための試験と構造の認定試験、構造/熱解析を行う数学モデルの妥当性を評価するための試験を行った。RMS コンソールは、主構造の認定試験後、機器をラックに組み込んで熱的な特性、電気的な特性を評価した。その後二つのアセンブリを組み合わせたシステムとしての性能を評価するため、システム試験を行った。

3 開発試験

主要な構成機器の開発モデルを製作し、親アーム、RMS

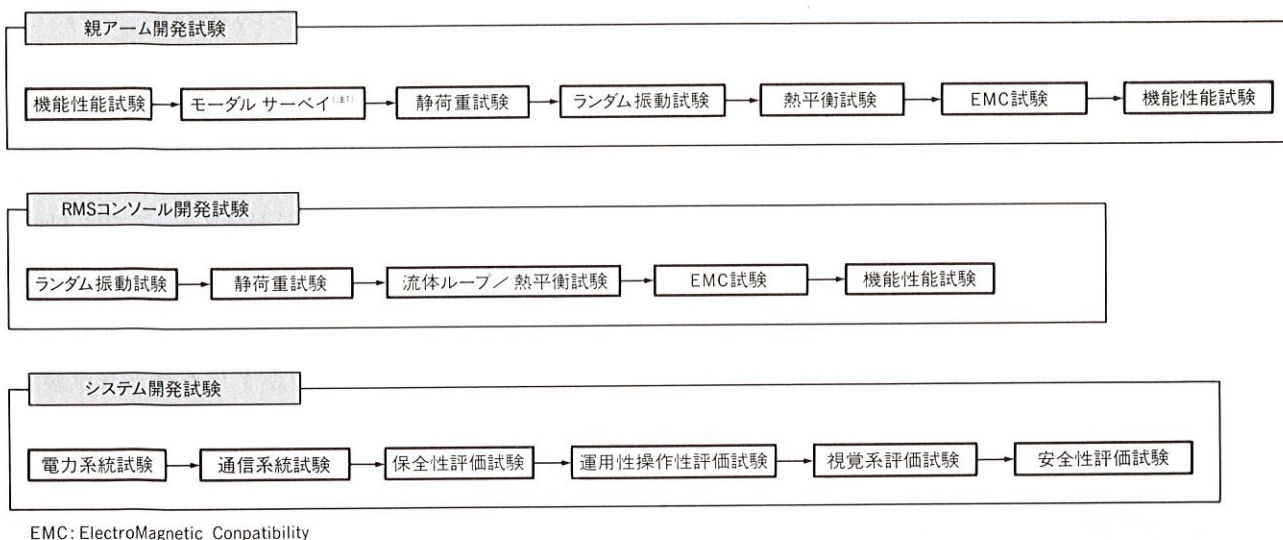


図3. 開発試験フロー 開発試験は、構造の認定および性能評価で、解析モデルが実際の宇宙空間と同一であることを見極めるためのデータ取得を目的として行った。

Flow of development model tests

図4にシステム試験の構成を示す。この試験は宇宙開発事業団筑波宇宙センター宇宙ステーション試験棟で行った。この試験のためにクラス10万のクリーンルーム内に10m×10mの大きさの精度JIS1級クラスの定盤を製作し、その上で約800kgある親アームを空気軸受を使って浮上させ、重力をキャンセルさせることで二次元平面でのアーム駆動を行うことができる。また、微小角度の範囲では、上部からワイヤで吊すことで三次元的な駆動の検証もできるように試験ジグも製作し試験を行っている。

制御特性については地上で行った試験(図3)で取得したデータから、コンピュータ上の解析モデルの特性と宇宙空

間での三次元的なアームの特性が同一であることを見極め、ハードウェアが実際の宇宙空間で所定の性能が得られることを確認した。

4 操作性・安全性評価

JEMRMSは、与圧部内のRMSコンソールに搭載される操作機器(ラップトップコンピュータ、スイッチパネル、ハンドコントローラ、テレビモニタなど)を使用して宇宙飛行士がアームの操作を行う。また機器の万が一の故障時には、宇宙飛行士のIVA、EVA作業によって機器交換などの保全作業を行う。それら作業のためにさまざまなHMIを持っている。HMIの妥当性の検証は、通常のハードウェアの機能性能試験のように電気的な信号や計測データの仕様値との比較による確認では実施できないため、1G重力下での模擬操作や宇宙空間での無重力環境を模擬した条件下でのデモンストレーションが必須(す)である。

そのため開発フェーズでは、NASA宇宙飛行士によるさまざまな評価を行った。

4.1 マニピュレータの操作性評価

RMSコンソール操作機器の評価のため、下記の各種評価試験を行った。

- (1) 東芝から提示したRMSコンソール図面にに基づき、NASAジョンソン宇宙センターで製作したモックアップに対する宇宙飛行士、技術者による評価試験
- (2) 東芝京浜事業所でNASA宇宙飛行士3名による、EMコンソールを使った模擬操作によるレイアウト評価
- (3) RMSコンソールではラップトップコンピュータでコマンドの入力、テレメトリの表示を行うが、そのため

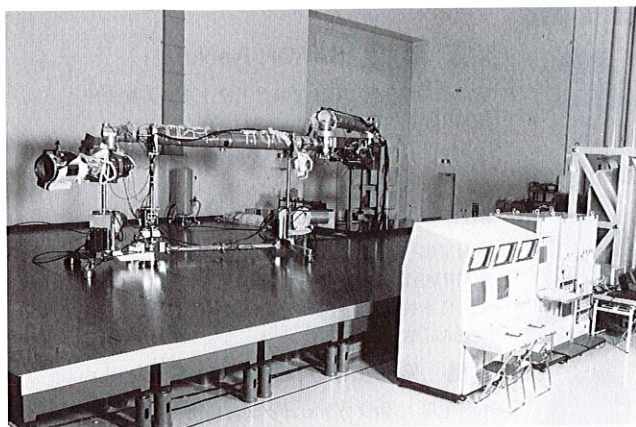


図4. システム試験の構成 システム試験は、親アームを大型定盤上で空気軸受を使用し自重をキャンセルすることによって行った。

Setup for system tests

(注1) 構造物の振動応答を測定し、それを基に固有振動数、減衰特性、振動モード形状などの振動特性を解析により求めること。

のヒューマン コンピュータ インタフェース (HCI) をもつ。この妥当性確認のため、製作した HCI のプロトタイプに対する NASA ジョンソン宇宙センターでの 6 名の宇宙飛行士による評価

- (4) HCI については、米国側のロボティクスワークステーションとの共通化について、その後も技術会議などを開催し調整を継続中
- (5) EM システム試験時に若田宇宙飛行士による操作性評価 (図 5)

以上の評価より RMS コンソールは基本的に無重力環境下



図 5. 宇宙飛行士による操作性評価 システム試験の構成で、若田宇宙飛行士が操作性を評価した。
Operational evaluation by flight crew

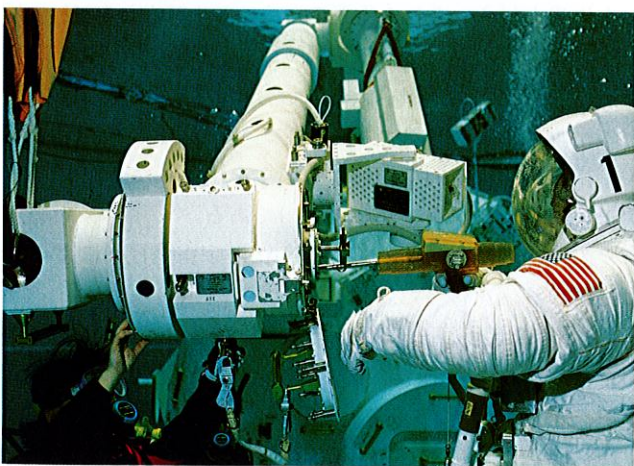


図 6. 水中試験による EVA 作業の評価 筑波宇宙センター無重量環境試験設備で、EVA 作業に対するデモンストレーションを行った。
Underwater demonstration of EVA tasks at TKSC WETS

でのロボット操作に問題ないことが確認され、また一部修正点についてはフライトハードウェアへの反映を行った。

4.2 EVA 保全作業評価

EMU と呼ばれる宇宙服を装着した宇宙飛行士が宇宙空間で行う EVA については、実環境を模擬した水中でのデモンストレーションが要求される。開発フェーズでは 3 回の水中試験を実施した。1 回目、2 回目は NASA マーシャル飛行センターで水中試験の技術取得を兼ね基本設計フェーズでの EVA 設計の妥当性を評価した。その結果を詳細設計に反映し、筑波宇宙センターに設立した無重量試験設備 (WETS) で NASA 宇宙飛行士 6 名が参加して、3 回目の水中試験を実施した。その実施状況を図 6 に示す。水中試験では作業場所、足場の位置、機器へのアクセス性、操作性、ビジュアルマーキングなどさまざまな項目を評価し、EVA 作業性の向上を図るよう設計に反映した。

5 あとがき

JEMRMS の概要と開発試験および有人宇宙開発固有の HMI 評価試験の実施状況を述べた。現在 2001 年からの打上げに向け、フライトハードウェアの製作・試験を行っている。国際宇宙ステーションに米国、カナダ、ロシア、ヨーロッパそしてわが国の開発した機器が集まり、10 年以上の長期にわたり各国の宇宙飛行士が常駐して運用を行う。そのため安全性、生産性に配慮したシステムの開発を確実に進めていくことが今後も必要である。



松枝 達夫 MATSUEDA Tatsuo

宇宙開発事業団 JEM プロジェクトチーム主任。
JEMRMS の開発に従事。
National Space Development Agency of Japan



佐藤 直樹 SATOH Naoki

宇宙開発事業団 JEM プロジェクトチーム副主任。
JEMRMS の開発に従事。
National Space Development Agency of Japan



桑尾 文博 KUWAO Fumihiko

小向工場 宇宙メカトロニクス技術部参事。
JEMRMS の開発に従事。日本機械学会、電子情報通信学会、日本航空宇宙学会、AIAA 会員。
Komukai Works



本橋 聖一 MOTOHASHI Shoichi

小向工場 宇宙メカトロニクス技術部グループ長。
JEMRMS の開発に従事。日本航空宇宙学会、日本ロボット学会会員。
Komukai Works