

長友 正徳
M. Nagatomo

杉浦 儔
H. Sugiura

岡村 良
R. Okamura

中村 和行
K. Nakamura

国際協力が進められている宇宙ステーション計画で、東芝は日本実験モジュール (JEM: Japanese Experiment Module) を構成している親子アーム方式のリモートマニピュレータシステム (RMS: Remote Manipulator System) を開発している。西暦 2000 年の JEM の打上げに先立ち、わが国初の宇宙用ロボットである JEMRMS (Japanese Experiment Module Remote Manipulator System) の制御性能の評価と作業性を検証するため、小型ロボットアームをスペースシャトルに搭載して実験する JEM シャトル飛行試験 (JFD: JEM Flight Demonstration) が 1997 年打上げを旨として進んでいる。

ここでは、JEMRMS の開発状況とスペースシャトルの安全帰還要求を満たすため船外活動適合設計となっている JFD の概要を述べる。

In the international collaboration program for the space station, Toshiba has been developing a mother-daughter type remote manipulator system (RMS) for the Japanese experiment module (JEM). In advance of the launching of JEM in the year 2000, the JEM flight demonstration (JFD) experiment using a small RMS will be conducted on the space shuttle in 1997 to evaluate the control characteristics of JEMRMS and to verify its functional efficiency.

This paper describes the development status of JEMRMS and provides an overview of the design of the JFD, which is extravehicular activity (EVA) compatible to ensure the safe return of the space shuttle.

1 まえがき

宇宙ステーション用として開発中の JEMRMS は、軌道上での組立や保全のために使用される親子アーム方式の宇宙用マニピュレータである。西暦 2000 年の打上げへ向けて、現在、エンジニアリングモデルの開発を進めている。

一方、この開発と並行して、ロボットアームの軌道上制御性能の評価と作業性の検証を目的とした JFD の開発も進んでおり、1997 年の打上げを旨としてプロトフライトモデル (PFM) の開発を行っている。

2 宇宙ステーション計画と JEMRMS

宇宙ステーション計画は、米国、欧州諸国、カナダ、および日本が参加して開発を行っている国際協力プロジェクトであり、わが国は JEM の開発でこの計画に参加している。

JEM では、与圧部内あるいは曝露部に設置した実験装置を用いて各種実験が行われる。JEMRMS は、与圧部の端面に取付けられ (口絵参照)、宇宙ステーション搭乗員が曝露部上の実験装置の組立や実験支援、さらに JEM の保全作業にこれを用いる。

JEMRMS は長さ約 10 m の親アームの先端に長さ約 2 m の子アームが着脱可能であり、両者とも 6 自由度の関節をもち、大型ペイロード (最大 7 t) のハンドリングは親アーム単独で行い、小型ペイロード (数 10 kg 以下) の取付け・取外しなどは子アームを装着した状態で作業を行う。

親アームおよび子アームの操作は、与圧部内の搭乗員により行われる。与圧部内には、RMS コンソールと呼ばれる操作・制御用ラックがあり、電源、管理・制御用計算機をはじめ、ハンドコントローラ (並進用、回転用)、テレビモニタ、操作盤、ラップトップワークステーションなど、搭乗員が直接操作を行うための機器が搭載されている。搭乗員は、これらの機器を用いて、自動モード (主として親アーム制御用) およびマニュアルモード (主として子アーム制御用) によりアームの操作・制御を行う。

3 JEMRMS の開発状況

図 1 に示すように、JEMRMS の開発は 1989 年の基本設計からスタートし、現在、詳細設計の後半に入ったところである。日本初の宇宙用マニピュレータの開発であるため、長期にわたってシステムと要素の技術開発を行っている。

年度 項目	1989 (H1)	1990 (H2)	1991 (H3)	1992 (H4)	1993 (H5)	1994 (H6)	1995 (H7)	1996 (H8)	1997 (H9)	1998 (H10)	1999 (H11)	2000 (H12)
主要マイルストーン			△ 基本設計 審査					△ 詳細設計 審査#1	△ 詳細設計 審査#2	△ 認定試験 後審査		△△△ 打上げ
システム設計		基本設計		詳細設計					維持設計	運用フェーズ		
開発基礎試験		システム/要素開発基礎試験										
EM製作試験			構成機器製作試験				システム組立試験					
PFM製作試験						構成機器製作試験		システム組立試験				

図1. JEMRMS 開発スケジュール JEMRMS の開発は 1989 年の基本設計からスタートし、現在、詳細設計の後半に入っている。

Development schedule of JEMRMS

また、設計・開発を評価するため、結合動作試験に用いる親アーム先端運動模擬装置やインタフェース検証にも用いられる子アーム操作性評価試験設備の開発も行い、宇宙開発事業団 (NASDA) 筑波宇宙センターに設置して活用している。

さらに、1993 年の米国航空宇宙局 (NASA) による計画見直しにより、それまで JEMRMS の管理用計算機に採用予定であった MPAC (Multi-Purpose Application Console) と呼ばれる計算機の開発が中止となったため、これに代わる独自の宇宙用計算機の開発を急ピッチで進めているところである。

親アームの構成機器である関節、ブーム、基部、テレビカメラおよび雲台は、エンジニアリングモデル (EM) の製作・試験を終了し、評価中である。ブームについては、開発基礎試験で取得した CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) のデータを用いて EM の設計・製作を行い、図 2 に示す静荷重試験において、もっとも厳しい終極荷重に耐えることを確

認し、構造認定を完了した。

テレビカメラについては、7 品種の部品開発を含め、EM の製作試験を終え (図 3)、設計評価後 JEM 共通カメラのフライトモデル (FM) の設計を確立する。この設計を基に、1995 年度からプロトモデル (PM)、および FM (計 10 式) の製作に着手する予定である。

これら親アーム構成機器は、おのおのの開発終了後、親アームに組み立てられ、システムレベルでの評価試験に用いる計画である。

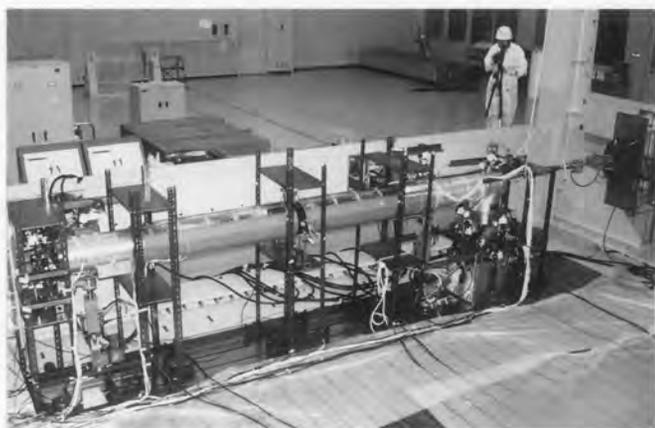


図2. 親アームブーム静荷重試験 静荷重試験を行い親アームブームの構造認定を終了した。

Static load test of main arm boom

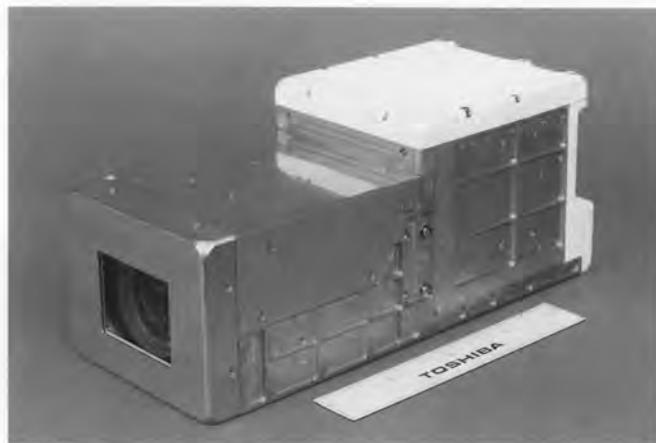


図3. JEM 共通テレビカメラ (EM) JEM の各部分で使用される共通テレビカメラの EM が完成した。

Engineering model of JEM TV camera

4 JEM シャトル飛行試験

4.1 概要

JEMRMS では親アームの先に人間に代わって精細な作業を

行う子アームを取り付け、船内からの遠隔操作によって支援作業を実施する。親アームのような腕の長いクレーンタイプのロボットアームでは、米国のスペースシャトルに搭載されている遠隔操作アームが広く知られていて、これまで衛星の放出、回収などの役目を果たしてきた。

しかし、船外での人間の腕の代わりをするようなアームの飛翔実績は今までにない。そこで、宇宙ステーションでの本格利用に先立ち、小型のロボットアームを用いて軌道上制御性能の評価と作業性を検証するためのJFDが計画された。

4.2 システム構成

JFDはスペースシャトルの貨物室に搭載されて宇宙空間にさらされる船外系機器と与圧された搭乗員室内に搭載される船内系機器に分けることができる。

船外系機器は、子アームとその駆動制御用エレクトロニクス、アームの作業対象物である軌道上交換ユニット(ORU: Orbital Replacement Unit)とヒンジ回りに回転する小型のドア、アーム制御計算機、通信ユニット、アーム電力変換器、電力分配器などの機器を納めたシステムエレクトロニクスボックス、搭乗員がアームの状態を監視するためのテレビカメラと照明装置、およびこれらを支持するための支持構造から成る。これらは、全体がMPRESS (Multi-Purpose Experiment Support Structure) と呼ばれるスペースシャトル貨物室用の汎(はん)用支持構造に搭載される。図4に船外系機器を示す。

図5に示す船内系機器は、搭乗員がアームを操作するために貨物室の直前に位置する後方船室に搭載される。ハンドコ

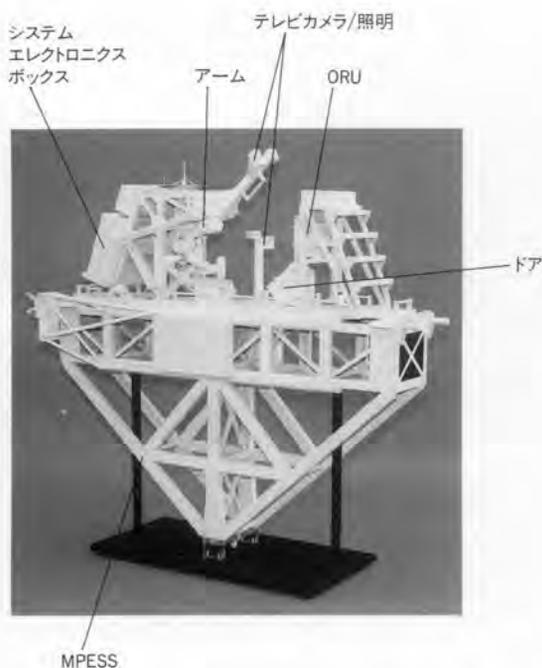


図4. JFD 船外系機器配置 (1/5 スケールモデル) 船外系機器はスペースシャトルの貨物室に搭載されて宇宙空間に直接さらされる。
Configuration of JFD in space shuttle payload bay

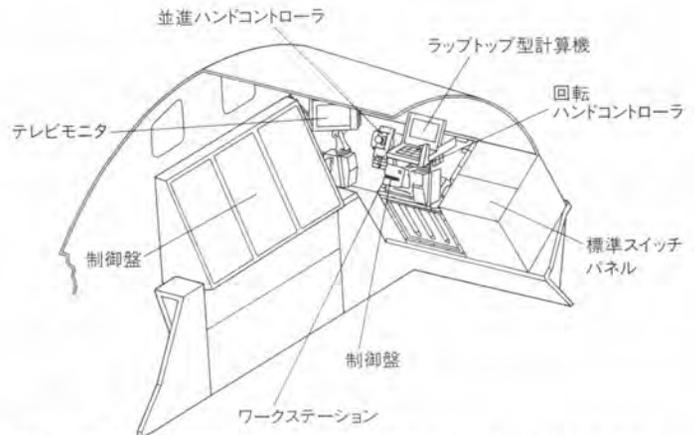


図5. JFD 船内系機器配置 船内系機器はスペースシャトルの与圧された乗員室に搭載される。

Configuration of JFD in space shuttle aft flight deck

ントローラ、制御表示盤、ラップトップ型の支援計算機がワークステーションと呼ばれる操作卓に集中して配置されている。この操作卓はアームの実験を行わないときには折り畳んで下部の支持構造内に収納される。この隣のパネルの内部床にはハンドコントローラの信号処理を行うための電子機器が配置される。また、このほかにアームの初期立上げやモード設定を行うためにJFD専用の制御表示盤やスペースシャトルの標準のスイッチ盤、テレビモニターなどを用いて実験を行う。

アームは、打上げおよび帰還時にはアーム保持解放機構によって保持され、軌道上で実験を行う際にはそれを解放して展開される。また、アームは6自由度の動きを可能にするため、六つの関節をもち先端には3本の指を開くことによって対象物を把持するエンドエフェクタとトルクドライバが一体となったツールが装着される。アーム先端部にはアームの位置合わせのためのテレビカメラが取り付けられている。ORUおよびドアにはアームの手先の指部と適合する標準把持部が取り付けられている。この把持部をアームでつかむためには、搭乗員の操作による把持部へのアームの正確な位置決めが要求される。このためにアームの先端部のカメラにより、把持部の横のターゲットを見てアームの位置合わせを行う。

スペースシャトルからの電力は、システムエレクトロニクスボックス内の電力分配器によって機器に供給される。通信ユニットで生成されたテレメトリデータは、地上との通信のためにシャトル側の機器に出力される。

搭乗員はモニター画面に映し出されるテレビカメラの映像と、ラップトップ型の支援計算機に表示される機器の状態を示すデータとを用いてアームの状態を確認する。アームの操作は並進および回転の二つのハンドコントローラを用いて行われ、カメラ、照明などの機器の操作、およびアームの制御状態の切換えなどは制御表示盤などから行われる。

4.3 軌道上遠隔操作ロボット実験

JEMで小型アームが行う作業は、主として曝露部に装着さ

れた箱型の軌道上交換ユニットの故障時の交換と軌道上実験のための支援作業である。JFD では、上述の作業を実現するために必要となるアームの制御性能の評価実験と、実際の作業を模擬して全体的な作業性を評価する実験とを実施する。

ロボット実験ではシャトルの飛行期間のうち 16 時間を利用するが、実際は二人の搭乗員によって、1 日 8 時間で 2 日間に分けて実験を行う。実験の最初と最後には船外のアームおよび船内の操作卓の展開収納作業があり、その時間以外を実際の実験に用いる。

アームの制御性評価実験として、あらかじめ地上でプログラムしておいたデータに基づき、関節軸ごとにアームを駆動する実験および手先を軌道に沿って動かす実験の 2 種類を行い、それぞれアーム自体の制御性能を評価する。また実作業の模擬実験では、ORU の交換実験とヒンジ回りに回転する小型のドアの開閉実験とを実施し、全体的な作業性の評価を行う。

実験中の機器の状態データおよびカメラによるビデオデータは軌道上あるいは地上で記録され、飛行後の評価に使用される。

4.4 船外活動適合設計

軌道上においてアームなどに故障が発生した場合には実験の遂行が困難になるばかりでなく、スペースシャトルの帰還に際して搭乗員の安全にかかわる事態が発生する可能性もある。このため、機器が故障した際には搭乗員の船外活動 (EVA: Extravehicular Activity) によって機能の一部の復帰あるいは修復が行えるような設計となっている。

具体的にはアームの保持解放機構からの解放と保持、ORU の収納、把持部の解放などを EVA により行うことができる。このためには宇宙飛行士を支持するためのハンドホールドを各所に配置したり、宇宙服の手袋や EVA 用の工具で操作可能な形状にしておくなどの配慮が必要である。また、そのほか

にも安全上の配慮から宇宙服に損傷を与えないように鋭利な部位をなくしたり、極端な高温・低温にならないように熱設計を行うなどの要求もある。

図 6 に若田ミッションスペシャリストらによる NASA の無重力環境訓練設備を用いた船外活動評価試験の状況を示す。

4.5 今後の展望

スペースシャトルに搭載する際には有人の輸送システムであるがために安全上の問題に配慮する必要がある。これは設計そのものに対して配慮を行い、さらに NASA の安全審査を受けて十分な安全対策が行われていることを証明しなければならない。現在、JFD は詳細設計を終え、PFM の製作フェーズにあり、今後フェーズ II および III の安全審査を経て、1997 年の打上げに向けて準備を行う。

5 あとがき

宇宙ステーション用リモートマニピュレータシステムの概要および開発状況について述べるとともに、スペースシャトルの安全帰還要求を満たすため船外活動適合設計となっている JEM シャトル飛行試験の概要を紹介した。

両プロジェクトとも、開発が本格化、運用・訓練の作業の比重が今まで以上に大きくなってきた。今後フライトシステム開発と運用システム開発の間の連携をうまくとりつつ、着実な開発を進めていく所存である。

謝 辞

この開発にかかわる諸機関および関連メーカー関係者各位のご協力とご支援に感謝の意を表する。



長友 正徳 Masanori Nagatomo

1970 年宇宙開発事業団入社。日本実験モジュール (JEM) の業務に従事。現在、宇宙開発事業団主任開発部長。National Space Development Agency of Japan



杉浦 儔 Hitoshi Sugiura

1967 年入社。人工衛星・宇宙機システムの開発・設計に従事。現在、小向工場宇宙ステーションプログラム開発担当部長。Komukai Works



岡村 良 Ryo Okamura, D.Sc.

1977 年入社。宇宙機のシステム設計・開発に従事。現在、小向工場宇宙ステーションプログラム開発担当課長、理博。Komukai Works



中村 和行 Kazuyuki Nakamura

1986 年入社。人工衛星・宇宙機システムの開発・設計に従事。現在、小向工場宇宙技術部主務。Komukai Works



図 6. 船外活動適合性評価試験 宇宙飛行士による NASA 無重力環境訓練設備を用いた EVA 適合性評価試験状況。

Test configuration for extravehicular activity