

宇宙ロボット：高機能ハンドシステム

Advanced Robotic Hand System (ARH) for Space Robots

あらまし

宇宙空間において人間の代わりに多様で器用な作業を行う宇宙ロボットの実現が望まれる。その基礎技術を実際に宇宙で検証するために、世界的にも最先端レベルの宇宙ロボット：高機能ハンドシステム(Advanced Robotic Hand System: ARH)を開発した。

従来の宇宙ロボットは、マニピュレータの先端に専用の結合機構を持つクレーンのようなものであった。ARHは、宇宙飛行士の手先に匹敵する器用さを実現するために、3本の指と5種のセンサを持つハンド、小型のアームおよび制御装置などを搭載機器として有し、地上には遠隔制御のための運用システムを持つ。センサ情報に基づき衛星上でフィードバック制御により自律的に動作する機能や、地上からの遠隔操作指令に基づき制御位置の誤差を吸収して動作する機能などを有する。この3月には宇宙において基本的な機能の確認を完了した。本稿では、この開発背景、システムの特徴・構成および宇宙実験について概説する。

Abstract

There is a growing need for space robots aboard spacecraft to perform a variety of precise tasks currently being performed manually by astronauts. To evaluate the basic technology necessary for such robots, we developed the Advanced Robotic Hand System(ARH)as the precursor to the next generation of space robots.

Most space robots aboard spacecraft these days employ manipulators and end effectors to handle objects in a manner similar to operating a crane. The ARH features manual dexterity comparable to human dexterity, and consists of a robotic hand and mini-arm, along with onboard control equipment, testing tools, and a ground-based remote control system. The hand features three fingers and five types of sensors; it performs precise tasks automatically under onboard feedback control based on information from the sensors, and by considering positional error in response to teleoperation commands issued from the ground. Preliminary evaluation of the ARH in space was completed in March 1998. This paper describes the developmental background, features, configuration and space testing of the ARH.



三上龍男（みかみ たつお）

1978年名古屋大学大学院工学研究科修了。同年富士通入社。以来深宇宙軌道決定システムの開発、宇宙ロボットの開発に従事。
宇宙開発推進室第二開発部



町田和雄（まちだ かずお）

1970年北海道大学工学研究科精密工学専攻修士課程了。同年電子技術総合研究所入所。以来宇宙用電気推進システムの研究に従事。1982年より宇宙ロボティクスの研究に従事。極限技術部宇宙技術研究室長。日本ロボット学会論文賞受賞(1995年)。現在、宇宙ロボットラボ、宇宙保全システムラボなどのリーダー。



秋田健三（あきた けんぞう）

1965年富山大学文理学部理学科卒。同年神戸工業入社。1968年合併により富士通に転籍。半導体材料の開発に従事。1985年東京大学より工学博士の学位を取得。1990年より宇宙機器関係の開発に従事。1992年(財)無人宇宙実験システム研究開発機構に出向。
技術本部研究開発第三部

ま え が き

現在、実用化されている宇宙ロボットとしては、米国スペースシャトルのマニピュレータがある。日本人宇宙飛行士の若田さんが操作したことは記憶に新しい。これに類似したマニピュレータは、国際宇宙ステーションの建設でも使用される。これらは荷物を専用の固定機構でつかんで移動するもので、大型クレーンのようなものである。宇宙飛行士が監視しながら定型的な作業を行うのには向いているが、宇宙飛行士に代わる柔軟で器用な作業は行えない。将来の宇宙活動では、組立・保守・修理など、宇宙での作業要求は高く、宇宙飛行士の作業負担を減らし、また危険な作業から解放するために、人間に代わり多様で精密な作業を行える宇宙ロボットが必要とされる。

このロボットを実現する技術上の鍵は、多自由度・多重センサを持つ器用なハンドである。通商産業省(MITI)では、将来の宇宙空間での産業利用を効率的に進めるための要素技術として、高機能なハンドを持つロボット(高機能ハンドシステム: Advanced Robotic Hand System: ARH)の宇宙実験を計画した。富士通は、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)との契約により本プロジェクトに参画し、代表研究者の電子技術総合研究所(MITI/ETL)の指導の下で開発を進めた。まず、1992年度に予備設計に着手し、1993年度に基本設計、1994年度に詳細設計を行った。1995年度に衛星搭載品の製造が完了し、1996年5月にARHの搭載品を衛星全体の開発者に引き渡した。その1年後にARHの地上システムを完成させ、運用開始までシステム検証や訓練に供した。ARHの搭載品は、宇宙開発事業団(NASDA)の技術試験衛星 型(ETS- : きく7号)に搭載され、1997年11月28日に種子島から打上げられた。1998年3月にARHの宇宙実験が開始され、今後約1年間にわたり精密作業の宇宙実験が実施される。

ARHの宇宙実験の目的は、多自由度・多重センサを有するハンドの宇宙精密作業での有効性を検証すること、地上から宇宙ロボットを遠隔制御する技術を確立することなどである。類似の宇宙ロボットとして、ドイツが1993年にスペースシャトルを用いて実験したROTEXがある。⁽¹⁾ このロボットはアームの先端に2自由度のグリッパを持つ。機器はスペースシャトルの船内に設置され、数日間実験が行われた。一方、ARHは多自由度・多重センサからなるハンドを持ち、宇宙空間に曝露された過酷な環境で1年半にわたる宇宙実験に耐えるシステムであり、より本格的な次世代宇宙ロボットの実験システムで

ある点でROTEXとは異なる。宇宙飛行士のいない宇宙曝露環境の下で、多重センサ系により状況を判断し、精密作業を行う宇宙ロボットは、世界でも初めてのものである。

開発の課題

衛星搭載の機器は、地上用とは異なり、打上げ時の振動・衝撃や、強い放射線、高真空、激しい温度変化など過酷な宇宙環境に耐える必要がある。振動では約20 Gのランダム振動に耐え、1,000 Gの衝撃に耐える必要がある。これは、地上の精密機器に要求される耐環境性をはるかに越える過酷なものである。宇宙空間は真空であるため対流による熱伝導がなく、熱対策がなければ、衛星構体外部の機器はマイナス百度、プラス百度以上の変化をする。多層断熱材(MLI)で断熱などを行い、好ましい熱的設計をしても-40 ~ +60 程度の熱的条件に耐える必要がある。

地表では大気により宇宙の放射線は遮断されているが、宇宙では約10 Gy以上の放射線に耐える必要がある。重量・電力・寸法などのリソースも制約される。地上宇宙間の通信では、通信時間・データ量も制約され、伝送遅延は4~6秒と大きい。また、いったん打上げたら保守が不可能なため、高信頼で動作することが要求され、開発費用は莫大なものとなる。

ARHの開発では、これら宇宙特有の制約とコスト的制約を踏まえ、現状技術を見極めて、前述の目的にかなう精密作業を行うロボットシステムを開発することが課題であった。

ARH システムの特徴

全体システム

衛星搭載機器はリソースの制約が厳しいため、地上から遠隔制御するテレロボットシステムでは搭載系と地上系の機能配分が重要となる。ロボットの高速な制御部分は搭載計算機で行い、リソース要求の大きい知的制御や動作監視は地上のワークステーションで行うこととした。次世代宇宙ロボットの制御方式を考慮し、地上から逐次的に遠隔操作指令を送る遠隔制御のほか、地上からのマクロ指令に基づき、搭載系のセンサ情報をフィードバックして作業を遂行する自律制御機能も持たせた。⁽²⁾

ARHシステムの概念を図-1に示す。搭載系として、高機能なハンド、小型アーム、および実験用部品を配置した作業台が衛星構体の外部に、搭載計算機・ソフトウェアおよび電源制御装置が衛星構体内部に搭載される。これらはARHの地上システムから遠隔制御される。ETS-

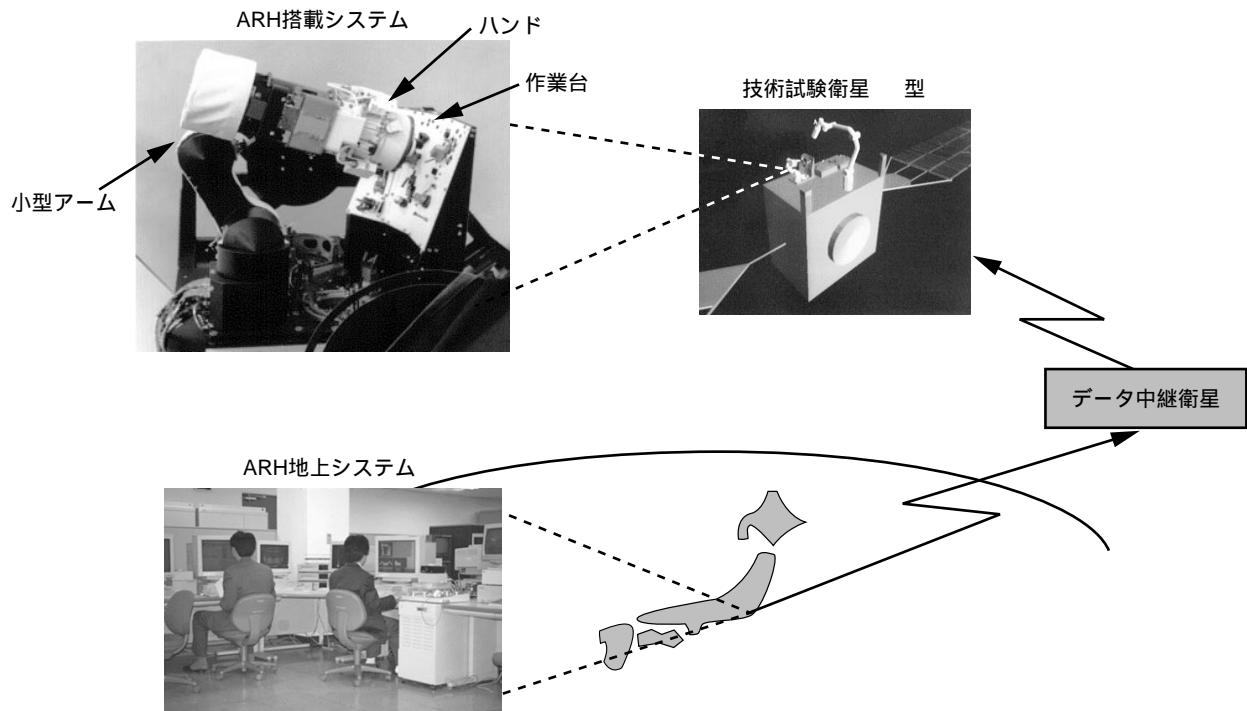


図-1 ARHシステムの概念
Fig.1-System concept of ARH.

は、高度約 550 km、軌道傾斜角35度の地球周回軌道を周期100分弱で飛行する。このため、地上から宇宙ロボットを直接制御するには通信可能時間が短すぎるため、データ中継衛星を経由して行う。また、衛星には、ARHのほかNASDAが開発したERAと呼ばれる2.4 m長のアームも搭載され、ハンドをERAの先端に装着することが可能である。ARHの主要諸元を表-1に示す。

ハンドおよびアーム

従来、宇宙ロボットの把持機構は1自由度のツールである。宇宙ロボットが部品レベルを扱い精密作業を行うには、位置や力を精密に調整できる手先が必要である。器用さを増すには多関節からなる複数指のハンドが望ましいが、これは研究段階であり、把持安定性や制御の複雑さによる信頼性低下がある。そこで、多様な形状の把持物への対応、安定した把持、および搭載計算機的能力を考慮し、多重センサを有する3自由度3本指のハンドを新たに考案した⁽³⁾。ハンドの形状を図-2に示す。ボールネジによる直動機構からなる指と、減速機とリンクによる旋回機構を用いた2本の回転指により、最大20 Nの力で対象物を把持できる。直動指は、スプリングで支持したピンアレーのなじみ機構を持ち、把持物を確実に把持できる構造とした。アームの位置誤差やワーク接触時の衝撃を吸収するコンプライアンス制御は、搭載計算機への負荷軽減を考慮し、フローティングさせた板バネによ

表-1 ARHの主要諸元

項 目	仕 様
搭載重量	45 kg
寸法	幅500 × 奥行480 × 高さ500 mm
平均電力	80 W
ハンドの自由度	3
把持力	20 N
コンプライアンス	0.15 mm/N(x , y) , 0.08 mm/N(z) , 3 deg/Nm(z)
小型アーム自由度	5
精度	± 0.5 mm , ± 0.3 deg
先端力, トルク	20 N , 5 Nm
通信速度	
コマンド	800 bps
テレメトリ	1.5 Mbps (画像データ含む)
寿命	1.5年

る4自由度のメカニカルな機構を考案した。また、自律的に精密作業を行うために、ハンドには五つのセンサを設けた。対象物を撮像するハンドアイカメラ、対象物までの距離をレーザで計測する距離センサ、把持時の指の圧力を計測する把持力センサ、ハンドの手首に加わる力とトルクを計測するカトルクセンサ、手首の微小な変位を計測するコンプライアンスセンサである。また、将来ハンドの着脱技術は重要となるため、ハンドは衛星上で自律的に着脱可能とした。ハンドとアームの結合機構部を標準化し、ERAとの結合が可能である。ハンドやアームの開発では、機能・寸法・操作性など人間の手为目标にした。

アームの開発では、富士通で過去に開発した民生用マニピュレータFAROTの技術をベースとし、宇宙化を図っ

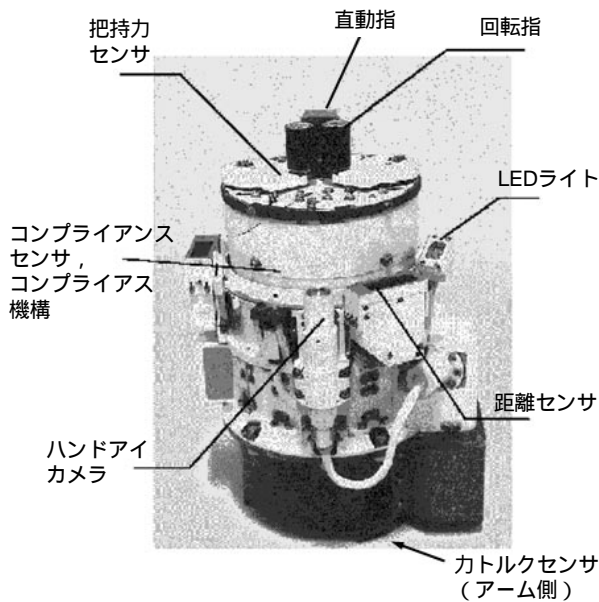


図-2 ハンド
Fig.2-Hand configuration.

た。ハンドを任意の位置・姿勢で動作させるためには、アームの自由度が高い方が望ましい。搭載重量の制約から5自由度の多関節アームとしたが、作業台とアームとの相対位置を整合させることで多様な実験に対応できる。関節は宇宙用のアクチュエータ、ハーモニックギア、レゾルバを用い、 $\pm 0.5 \text{ mm}$ の相対位置精度を実現した。アーム先端力は20 Nである。アーム先端にはハンドを衛星上で着脱するため3本の爪のツールを持ち、両者を機械的に結合するとともに、電気コネクタの結合も行い、自力で作業可能な状態にする。

機構部の潤滑として、曝露環境に直接さらされる部位には宇宙用グリースが使用できないため、ハンドでは二硫化モリブデン焼成膜による固体潤滑を用いた。固体潤滑膜の寿命は、使用条件に大きく影響されることから、部品レベルの真空寿命試験を実施し、設計の妥当性を検証している。アームの潤滑では、ハーモニックギアに宇宙用グリースを用い、蒸発やトルク損失の軽減を図った。センサや回路などは、開発コストを考慮し、民生部品をベースとして宇宙対応を図った。放射線対策として、カメラの回路部はアルミ合金で保護し、CCDや距離センサ、LEDなどの光学素子は撮像面を耐放射線強化ガラスで保護した。地上で放射線の耐性も試験した。ハンドやアームの熱環境対策としては、コンピュータによる解析と実機相当のモデルによる試験で評価し、熱制御塗装やMLIを組み合わせることで機器温度の安定化を図るとともに、ヒータによる能動温度制御も併用した。

ハンドおよびアームの系としては、基本設計において

機能確認用のモデルを試作し、電気・機械的な機能確認を行い、詳細設計ではフライト品相当の機能・性能を有するエンジニアリングモデルを開発し、耐宇宙環境性を含め評価した。とくに、精密機構を有するハンドやシリアルリンクのアームにとって、前述の振動・衝撃は極めて過酷であり、設計課題が多かった。振動の共振を低減させ固定部の負荷分散を図るため、打上げ形態までさかのぼって見直し、ハンドとアームを分離して固定する設計とした。とくに、打上げに耐える強固な固定と、宇宙でハンド・アームの容易な開放という相矛盾する要求を構造的に解決する必要があった。衝撃に対しては、余り剛すぎるとストレスが集中するが、柔構造では振動条件にあわない。スーパーコンピュータのシミュレーションによる解析や、実機相当のモデルによる多数回にわたる振動・衝撃の評価試験を実施し、解決策を得た。これらの結果を反映して搭載品の開発を無事完了できた。

無重力下で動作する宇宙ロボットの開発では、いかに重力を補償して試験するかも課題となった。水槽を用いて浮力で重力を補償する方式もあるが、大規模となりコスト的にも現実的でなかったため、簡易的にハンドの重心を吊り、張力制御する方式を用いた。

制御装置

ハンドおよびアームを制御する搭載計算機では、科学衛星搭載計算機の実績をベースに、ロボットのリアルタイム制御を可能とするCPU(80386/387)を冗長構成とし、サーボ制御にはDSPを用いた。リソースの制約からROMは128 Kバイト、RAMは256 Kバイトの容量とした。衛星バス系から供給される一次電源をARH搭載機器に供給するための安定化電源供給部、ハンドアイカメラの制御部、およびアームのモータドライバからなる制御装置は、開発の容易性から搭載計算機とは別の筐体とした。

搭載計算機はマルチタスク対応のOSを持ち、ハンドやアームの制御のほか、センサデータの取得・処理、カメラ取得画像の処理、地上とのテレメトリ・コマンド処理などをソフトウェア制御で実現した。搭載計算機のメモリ容量の制約からソフトウェアサイズは制約されるが、地上からソフトウェアをアップロードすることで多種多様なソフトウェアによりロボットを制御できるアーキテクチャとした。⁽⁴⁾これにより打上げ後も最新制御技術を取り入れた多様なロボット実験が可能となる。

また、搭載ソフトウェアでは、ハンドアイカメラ画像の2次元情報と距離センサの奥行き情報から、接触しない対象を3次的に計測し、カトルクセンサとコンプライアンスセンサにより対象物との誤差や作用力を計測

し、把持力センサで掴む強さを調整することで、精密作業を実現している。打上げによる機器誤差なども、これらの計測により搭載系で校正される。また、地上からの指令に基づくアーム動作が許容範囲内かの安全性チェック、搭載センサのフィードバック制御による位置誤差補償などの機能も持つ。これらセンサ情報は、ロボットの作業環境を地上で監視するためにも使用される。

地上システム

人間がそばで直接見たり触ったりできない宇宙で精密作業をロボットに行わせるには、作業環境を随時計測し、地上の操作者の判断・確認を得て作業を進める必要がある。地上システムは、宇宙ロボットを遠隔制御するためのマスタ装置、搭載機器の状態を監視・制御する装置、ロボットの動作をシミュレーション表示する装置、および搭載画像をモニタする装置などからなる構成とした。

このシステムは、デスクトップテレロボティクスの概念を採用しているのが特徴である。マスタ装置としては、従来のマスタアームとは異なり、マウスと簡易なダイヤル操作板とし、パソコンを操作する感覚で遠隔のロボットを統合して操作できる。また、従来の衛星運用と同様のコマンド・テレメトリ処理のほか、地上ワークステーションでは知的処理を行い、搭載系の制御能力を補う。宇宙で撮像した画像では作業の様子を十分把握できないため、ロボットの動作や多重センサのテレメトリデータからロボットの状態を可視化して操作者に3次元グラフィックスとして提示する。また、遠隔操作では数秒の時間遅延があるため、シミュレーションによりロボットの動作を予測表示することで操作性向上を図っている。

る。その他、ハンド・アームがほかの機器に干渉しないか、可動許容範囲内かなど、地上からの指令をチェックする機能や、テレメトリデータに基づき地上のモデルを搭載系に整合させるキャリブレーション機能もある。テレメトリデータの表示では、トレンドグラフ、レベルメータなど、データの特徴に合わせた表示を可能とし、操作者の視認性向上を図っている。搭載系と地上系を含めた制御フローを図-3に示す。

最後に、衛星に搭載したARHの機器を図-4に示す。

宇宙実験と今後の計画

ARHの宇宙実験は、ARH単体で行う「ハンド単独実験」と、ハンドをERAに衛星上で結合してNASDAと共同で衛星上のサービス実験をする「アーム装着実験」の2形態で行う。⁽⁵⁾ ハンド単独実験では、ハンドの高機能性を利用した部品レベルの精密作業の技術取得を主眼とし、アーム装着実験では大型アームのERAに結合したハンドによる精密作業性を確認する。実験項目と評価事項を表-2に示す。

実験運用としては、1 回約20分程度の実験時間で、1 日に2～3回実施する。ロボットの搭載面を地球に指向させて、昼間の地球反射光による照明が得られ、かつデータ中継衛星を介して通信が可能となる場合しか実験ができないため、実験時間はせいぜい1 周回30～40分程度で1 日数回しか確保できない。ARHの実験は、約1 年半の期間に延べ30日程度の宇宙実験を計画している。昨年の上げ後、今年3 月に初回実験としてアームの開放とハンド装着を実施した。今後、ボルトやコネクタ操作などの単独実験やアーム装着実験を実施する予定である。

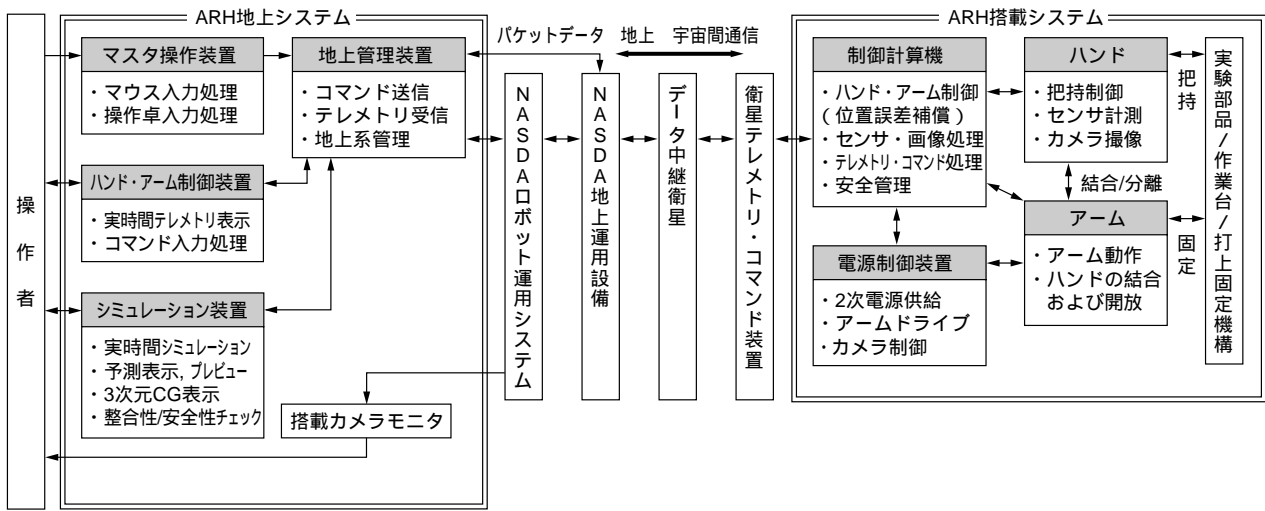
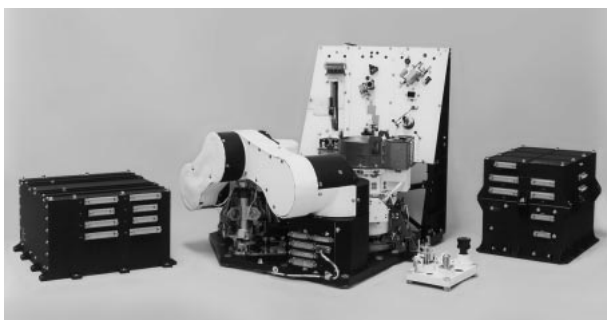


図-3 ARHの制御フロー
Fig.3-ARH control flow.

表-2 ARHの宇宙実験

実験項目	実験内容
〔ハンド単独実験〕 ・コネクタ着脱	電気コネクタを着脱し、LEDを点灯して、精密部品の取付けなどの技術（画像処理、精密位置決め、力制御）を検証する。
・ボルト着脱	ボルトの取外し・取付けを行い、力制御下での回転動作と把持技術を確認する。
・浮遊部品捕獲	部品を浮遊させ、捕獲する技術を確認する。
・太陽電池シート展開 （川崎重工実施）	太陽電池シートなどの柔軟なシート状の物を時間遅延下で遠隔操作する技術を確認する。
・ワイヤ操作 （東芝実施）	電気配線の基礎実験として、ワイヤを時間遅延下で遠隔操作する技術を確認する。
〔アーム装着実験〕 ・コネクタ着脱 ・試料交換	衛星上のコネクタを着脱する技術を確認する。 ほかの衛星上の試料を回収する技術の評価する。



(a)制御計算機 (b)ハンド・アーム(分離状態)と (c)電源制御装置
実験部品の作業台

図-4 ARHの衛星搭載機器
Fig.4-Flight model of ARH.

む す び

次世代宇宙ロボットとして、世界的にもトップレベルの宇宙用精密作業ロボットARHを開発し、宇宙実験で当初の成果を得た。ARHは、最新のメカニカル技術、制御技術、情報処理技術、通信技術、地上コンピュータ技術などを結集して開発することができた。

通商産業省や技術委員会の方々のご指導をはじめ、関係した方々の協力に感謝する。

参 考 文 献

- (1) B. Brunner et al : Multisensory Shared Autonomy and Tele-Sensor-Programming-Key Issues in the Space Robot Technology Experiment ROTEX. IROS'93, pp.2123-2139(1993)
- (2) K. Machida et al : Precise EV Robot : Flight Model and Telerobotic Operation for ETS-VII. IROS'96, 1996.
- (3) 村瀬ほか：宇宙ロボット用3指多重センサハンドの開発. 日本ロボット学会, 16, 1, pp.124-133(1998)
- (4) M. Moriya et al : Flight Software of the Advanced Robotic Hand System. IAF97, 1997.
- (5) 町田ほか：ETS-VII における高機能ハンドシステムの宇宙実験計画. 第41回宇宙科学技術連合講演会, 1997.