

「宇宙ロボット用高機能ハンド実験装置」の宇宙実験結果の概要

平成11年6月16日
通商産業省

1. プロジェクトの概要

通商産業省では将来の宇宙空間の産業利用を効率的に進めるための要素技術として、「宇宙ロボット用高機能ハンド実験装置」(ARH: Advanced Robotic Hand System)を開発し、宇宙開発事業団の技術試験衛星VII型 (ETS-VII)に搭載し宇宙実験を行ってきた。このシステムは3指ハンドによる精密作業性と多数のセンサによる自律機能を有したロボットで、宇宙飛行士の手作業相当の精細作業の基礎技術修得を目指して開発を進めてきた。宇宙実験の目的は以下のとおりである。

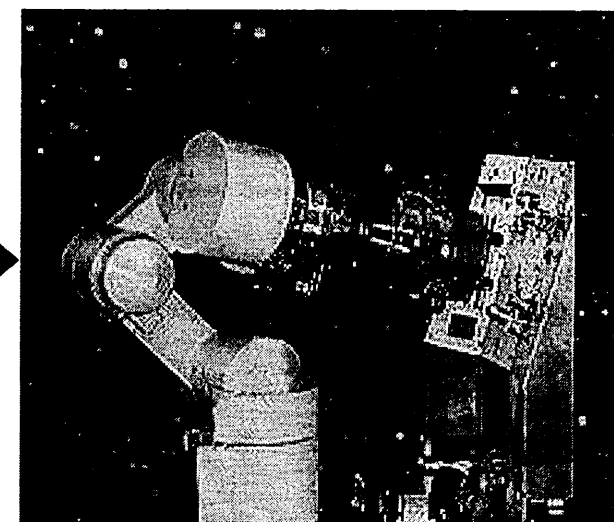
- 1) 多自由度、多重センサハンドの宇宙船外精密作業における有効性を検証すること
- 2) 地上から衛星間通信を経て宇宙のロボットに精密作業させる技術を修得すること
- 3) 宇宙の無重力や視覚環境でのロボットの高度制御技術を修得すること

本システムは1992年に予備設計を開始し、1996年5月にフライトモデルの製作を完了した。1997年11月28日にH-IIロケットにより打ち上げられ、4ヶ月の軌道上待機の後、1998年3月から宇宙実験を実施し、この度、定常段階の実験を終了した。

宇宙で精細作業を行うロボットは、これまで、ドイツが1993年にスペースシャトルでROTEXと呼ばれる船内ロボット実験を行ったが、これが1自由度グリッパのロボットによる有人スペースラブのラック内での数日の実験であったのに対し、本ロボットは過酷な宇宙船外での作業、3指ハンド(3自由度)による精密作業、1年半の長期実験、異種ロボットへのハンド結合による汎用利用、などが主な違いであり、世界初の無人宇宙機での精密作業ロボット実験である。



宇宙飛行士の手作業

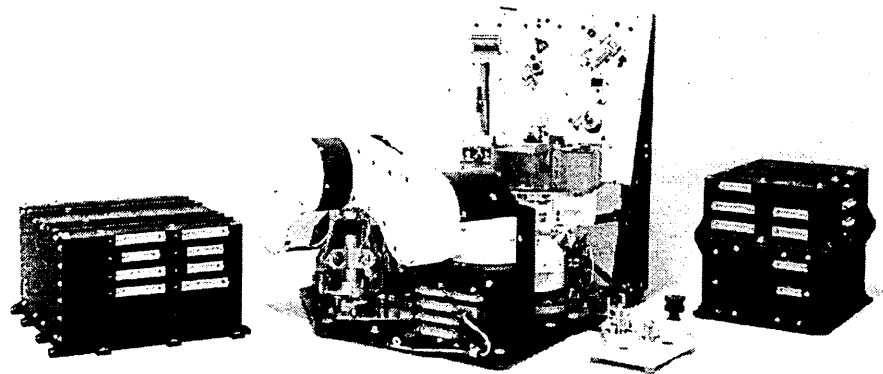
高機能ハンドによる軌道上精密作業
実験のイメージ

2. ロボットシステム

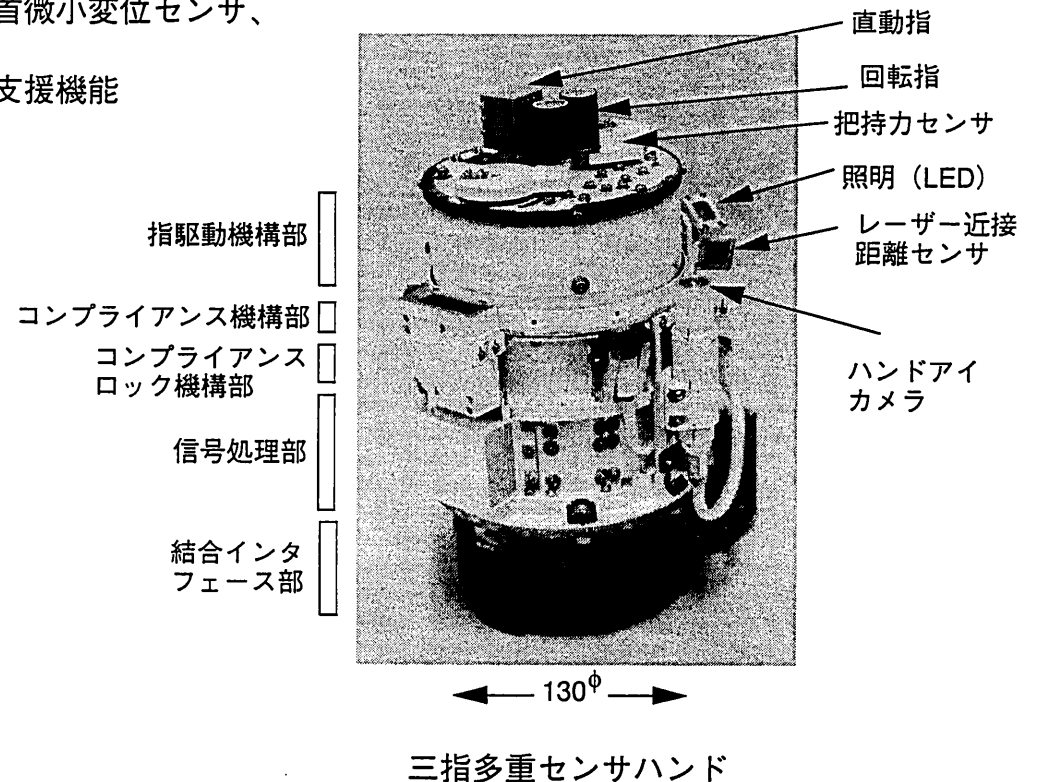
搭載ロボットシステムはハンド、小型アーム、タスクボード、制御計算機、電源装置から構成され、「ひこぼし」の地球指向面に搭載されている。また、ターゲット衛星（おりひめ）にはタスクパネルを搭載している。

このロボットの主な特徴は以下の通りである。

- 1) 3指ハンドによる精密作業性
 - ・親指に相当する直動指、人差し指と中指に相当する2本の回転指
 - ・柔軟な手首として機能するコンプライアンスリスト
 - ・数cmの幾何モデル誤差に対し、50 μ mの分解能の精密作業性を達成
- 2) 多数のセンサによる自律機能
 - ・ハンドアイカメラ、レーザービーム式距離センサ、手首微小変位センサ、指圧覚センサ、力・トルクセンサの階層的利用
- 3) センサ融合テレロボティクスによる地上からの遠隔作業支援機能



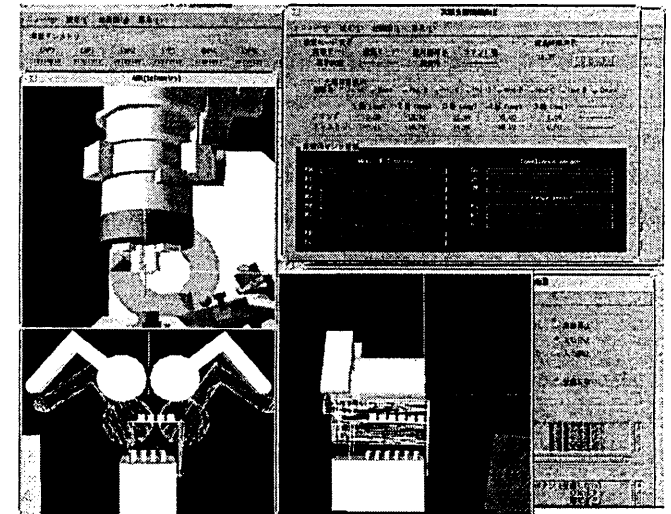
左から制御計算機、ロボット実験ステージ（折り畳まれた小型アーム、ハンド、タスクボード）、タスクパネル、電源装置



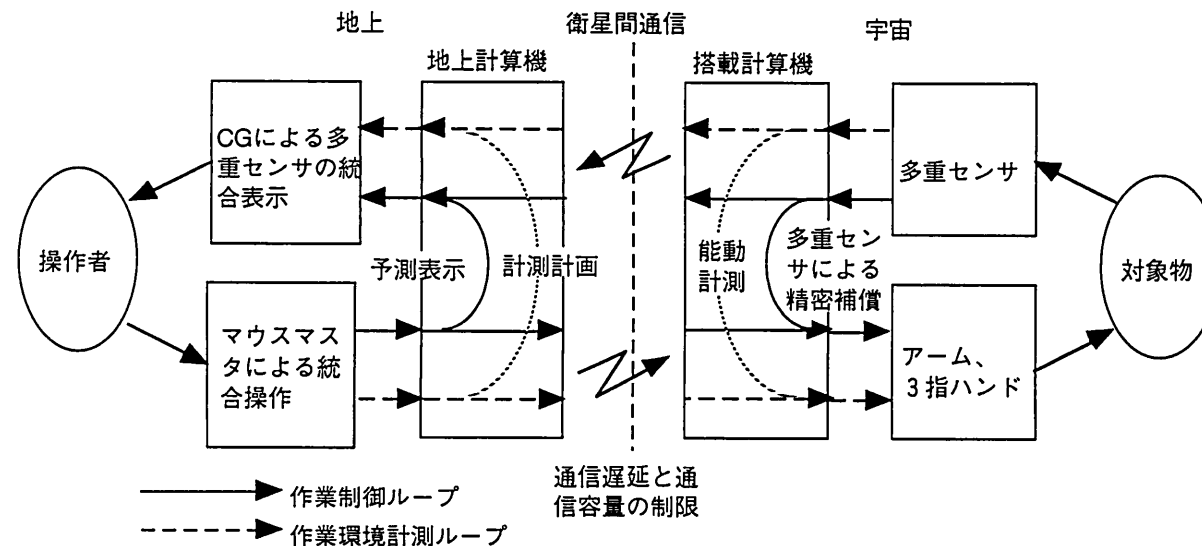
3. 遠隔ロボット運用システム： センサ融合テレロボティクス

遠く離れた宇宙のロボットを使役し精密作業を行わせるには三つの課題を克服する必要がある。第一は衛星間通信の制約のもとでの精密性の確保である。通信容量が少ないと高解像度の画像が地上で実時間で得られないため細部の遠隔操作は難しくなり、さらに通信遅延が大きいとその困難は著しく増す。第二は軌道上サービスは多くのタスクの積み重ねからなるが、その過程で位置誤差が累積するため、精密作業では従来の幾何モデルに基づく遠隔操作は困難となる。第三は作業空間の広い宇宙の精密作業では移動装置、腕、指等の多数の効果器の操作が必要となり、操作自由度とモニタするセンサが増し操作者の負担が増大する。

そのため、多重センサ情報を地上と宇宙の制御・処理ループで積極的に利用するセンサ融合テレロボティクスのアプローチをとった。第一の課題には、ハンドに配置した多重センサベースト制御とハンドの精密調整機構で対応する。第二の課題には多重センサハンドを用いて能動的に作業環境を計測することより対応する。第三の課題には腕、指等への指示を統合してできるデスクトップ操作装置の採用と多重センサのテレメトリ情報をグラフィックシミュレータに多元的に可視化表示することにより克服している。



シミュレータの3次元CG画面



センサ融合テレロボティクスの構造



デスクトップ型遠隔操作装置

4. 宇宙実験項目

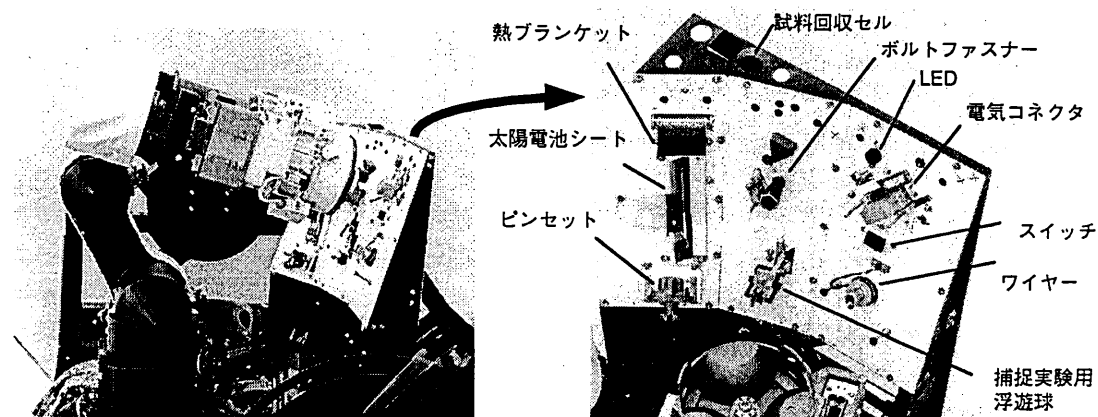
宇宙実験は、ハンドを小型アームに結合しタスクボードの部品に対し精密作業を行う単独実験と、NASDAのアーム（全長約2.4m）に結合しターゲット衛星のタスクパネルの部品に対しサービス作業を行うハンド／大型アーム結合実験の形態で実施した。

作業要素実験項目

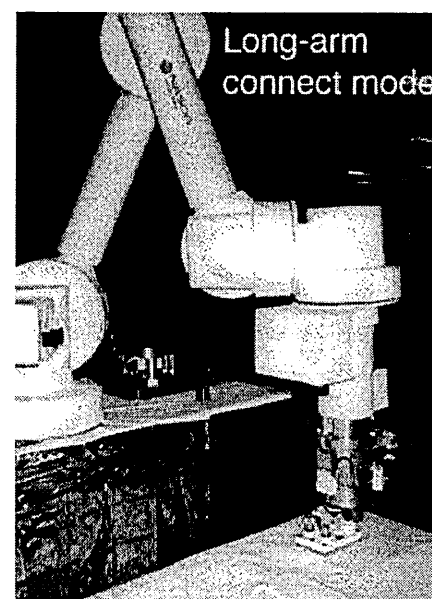
- 1) 精密機器の保守に関する作業要素実験
 - ・コネクタ着脱
 - ・ボルトファスナ着脱
- 2) 宇宙エネルギー機器の保守に関する作業要素実験
 - ・太陽電池セル展開・収納
 - ・サーマルブランケット展開・収納
 - ・ワイヤ操作
- 3) 日陰期間の活用に関する作業要素実験
 - ・スイッチ操作
- 4) 微小重力材料実験に関する作業要素実験
 - ・試料点検、収納
- 5) ロボット要素の相互利用に関する技術実験
 - ・ハンド／大型アーム結合

ロボティクスとしての技術実験項目

- ・多重センサを用いた自律精密制御技術
- ・地上からの遠隔操作による精密作業技術
- ・自律・遠隔融合による精密作業技術
- ・遠隔教示技術



タスクボード
単独実験のコンフィギュレーション

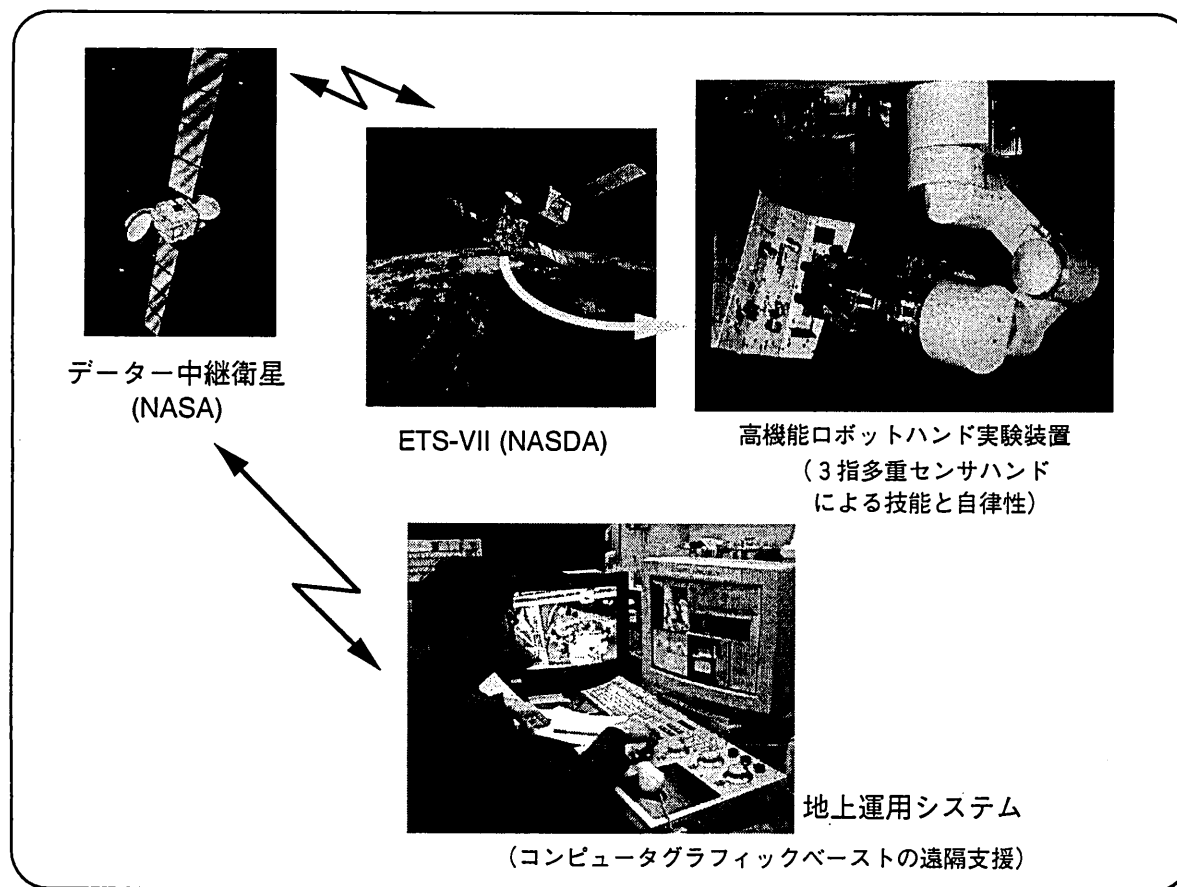


ハンド／大型アーム結合実験の
コンフィギュレーション
(MITI/NASDA共同実験)

5. 宇宙実験

5. 1 全体構成

上述の特徴を有するテレロボットを宇宙開発事業団の衛星「ひこぼし」に搭載し、同事業団の協力を得て宇宙実験を実施した。ロボットは高度550km、軌道傾斜角35度の円軌道を1周約96分で周回する衛星の地球指向面に搭載されている。運用は筑波宇宙センターに設置したロボット地上運用系から行う。コマンドデータは、同センターからデータ中継衛星(TDRS)の運用を行うNASAのGoddard Space Flight Centerに有線で送られ、さらにWhite Sandsの地上局に送られる。ここから静止軌道にあるTDRSに電波で送信され、衛星間通信で「ひこぼし」に中継される。受信されたコマンドは衛星データ処理系からロボット制御計算機に送られ制御が行われる。テレメトリデータは逆の経路を通り、空間的に巨大な制御ループを形成している。1巡の通信時間遅れは約5秒である。



宇宙実験システムの構成

5. 2 ロボットシステムの軌道上再構成

実験システムは約4カ月の軌道上待機の後、1998年3月22日から3月26日にかけて、初期機能点検を実施した。最もクリティカルなイベントは、アームを打ち上げ時の固定機構から解放し、軌道上でハンドを結合して作業可能な形態に再構成することであった。アームとハンドは打ち上げ時の振動（ランダム20g）と衝撃（1000g）に耐えるため分離してクランプ機構で剛に固定されているが、予圧した金属接触面の打ち上げ時の激しい動荷重による凝着、周回軌道での1700回を越える熱サイクルによる超高真空中のコールドウエルディングなど、地上試験では確認困難な部分があり、解放が正常に行われるかが第一関門であった。「解放タスク」の起動により、手先、肘、手首の固定機構が解除された。アームとハンドの結合は、ハンドへの精密嵌合や宇宙環境で電子機器間の電気結合が正常に行われるかがポイントであったが、力制御によりハンド結合部にアーム先端が挿入され、ツールによりハンドが結合され、作業形態への移行に成功した。

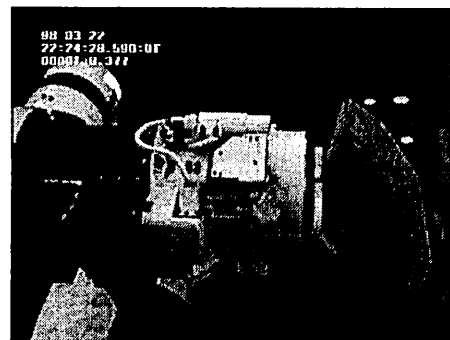
これは宇宙でロボットアームがハンドを自ら取り付けた最初の事例である。この再構成の技術は、将来、ロボットが体の一部を交換したり、合体などにより軌道上で作業形態を変えるための基礎技術にもなる。



アーム先端

ハンド結合
インタフェース

軌道上初期状態



作業形態への移行

（ハンド、アームの固定機構の解放、アームとハンドの結合、作業部品の打ち上げ固定機構の解除をロボットが自ら実施）

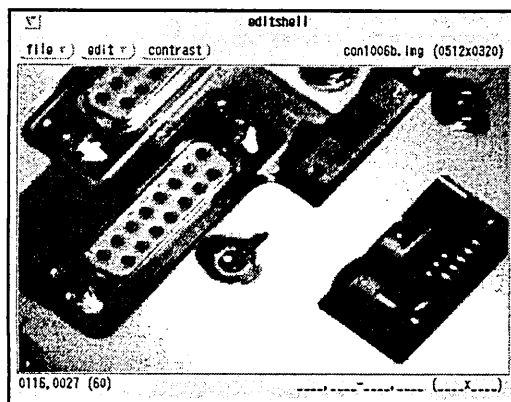


軌道上で作業形態に再構成されたロボット
（上は地球）

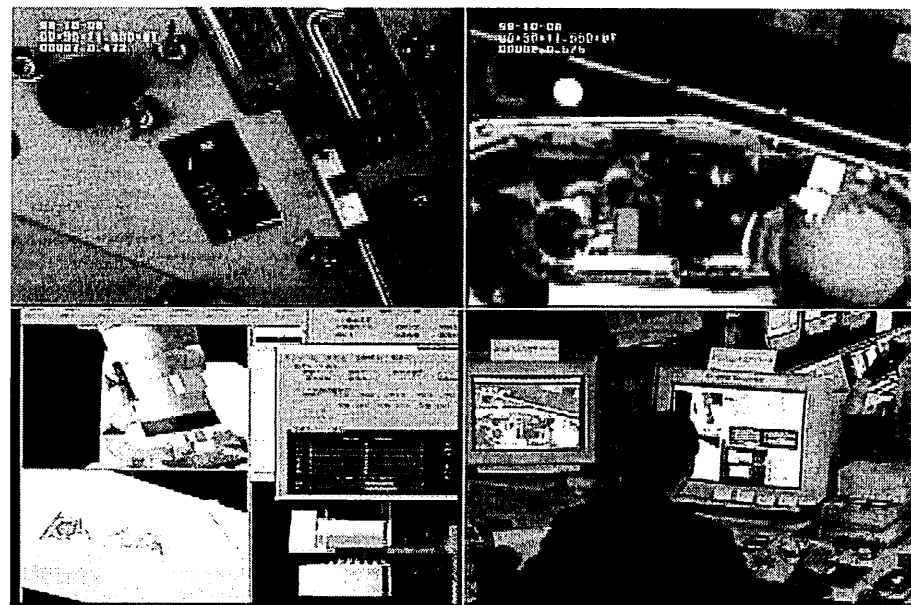
5. 3 多重センサ融合による精密作業実験

電子機器交換を行う際に特に精密さを要求される定形作業の代表として、電気コネクタ着脱を実施した。コネクタは多ピンであることとレセプタクルのガイドが狭いため、サブミリの精度で合わせて挿入する必要がある。ここでは、ハンドの多重センサを駆使して自律的にサブタスクを実行し、地上の監督者に結果の報告と次のサブタスクの続行の許諾を仰ぎながら作業を進めるスーパーバイザリー制御で運用した。ハンドの距離センサとカメラ画像情報を融合して局所作業座標系を生成し、レセプタクルの位置と傾きをピン配列の画像処理により同定し、指の圧覚と手首への力の加わり具合をロボット自ら判断しながらコネクタの脱着を実行し、作業を完了した。同様の作業を遠隔操作で行ったが、グラフィックシミュレータのCG画像と実世界の位置関係にずれが生じ、操作者の誤判断を誘い、結合不良となった。

また、地上から遠隔操作を効率的に行うため、自律制御と融合して操作する手法をボルトファスナの着脱作業で評価した。これは材料実験の試料や機器交換の際に必要な作業要素の一つであるが、精密な中心軸合わせ、ネジのソフトな回転かみ合わせ、かみ合わせが正常に行われているかの判断が必要なほか、ねじ込み時は回転と並進動作を同時に行う必要があり、作業能力を評価する上からも適当なタスクである。手首の力センサ、変位センサ、指の関節角、指の圧覚などのセンサ情報を総合的に用いたセンサ融合制御と、自由度を選択的に遠隔操作する手法をシェアし、効率的に作業できることが示された。操作デバイスとしてはアームや指の動きを統合的に操作でき、かつコンピュータグラフィックスでの指令に適したマウス型マスタを開発して用いた。このような融合手法で、従来の遠隔操作に比し効率の良い遠隔作業ができることを示した。



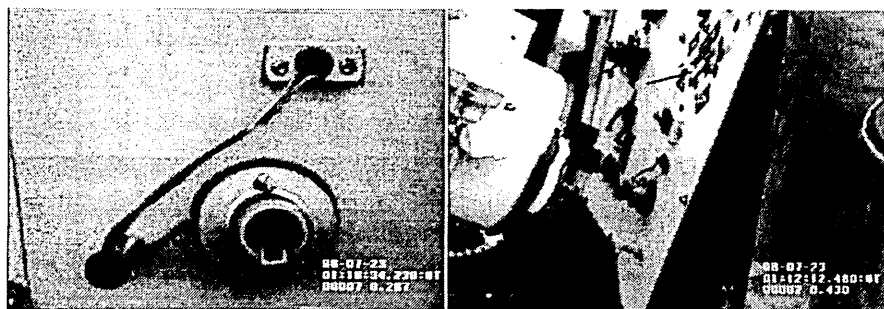
日陰での自律制御によるロボット作業
(LEDライトによるコネクタ画像と画像処理による位置計測例)



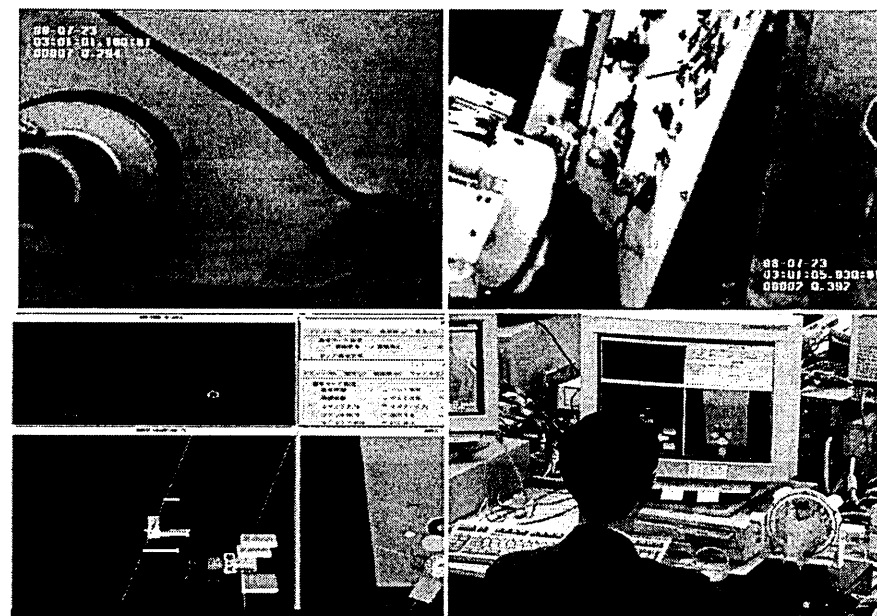
遠隔・自律融合操作によるボルトファスナの着脱実験

5. 4 ワイヤ操作実験（地上から宇宙のワイヤを配線する）

地上からの遠隔操作実験としてワイヤ操作を行った。これは、機器保守の際の配線を想定したもので、ペグに巻いてある電線を釘状のリールに掛け替える作業である。ワイヤがフレキシブルで形状が不規則に変わるため幾何モデルに依存した自律制御では困難なタスクで、人間の技能を遠隔操作でロボットに実時間で伝達する必要がある。ここでは、コンピュータグラフィックスでの予測表示と搭載制御計算機での操作入力修飾機能により通信遅延を補償する方法を用いて、従来の少し動かしては止めて待つ「ムーブ・アンド・ウェイト法」の操作効率を改善し、掛け替え作業に成功した。遠隔操作の様子と、ワイヤ掛け替え前後の写真を下图に示す。これは地上から無人宇宙機のロボットを遠隔操作した世界で最初の作業実験である。



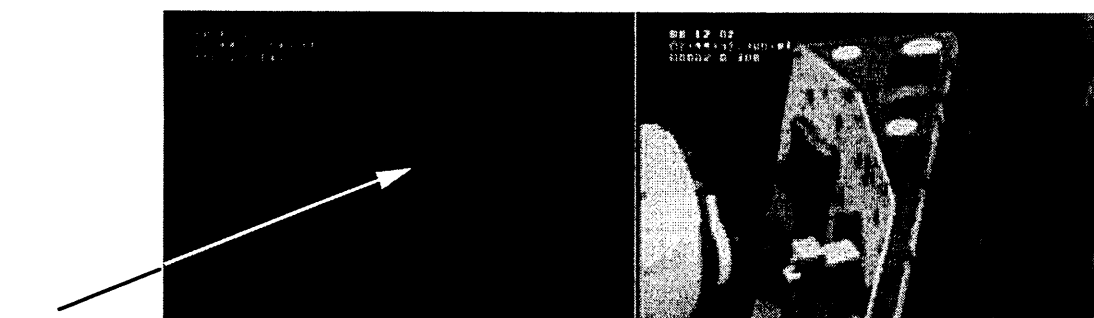
作業前（左：ワイヤとペグ、右：ハンド近傍画像）



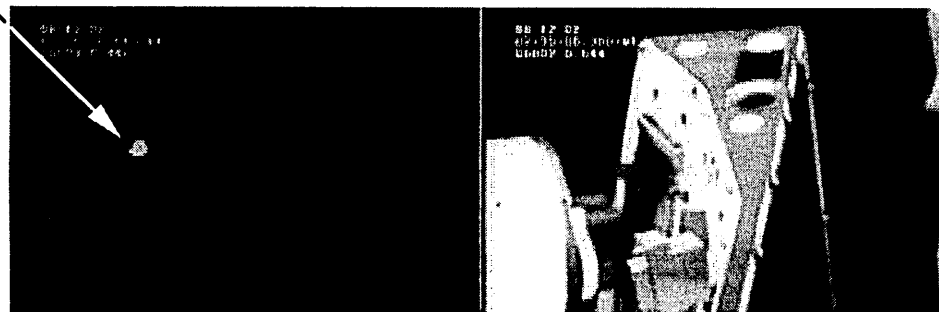
遠隔操作後（左上：ワイヤとペグ、右上：ハンド近傍画像、
左下：CG予測画像、右下：操作卓）

5. 5 太陽電池セル展開実験（太陽電池を張り付け、発電する）

将来の衛星の太陽電池や熱ブランケットなどの柔軟材料の保守の基礎技術を得るため、シート状の太陽電池の展開、貼り付け、発電確認、収納の一連の作業実験を行った。スーパーバイズド自律制御により、ドラムに収納された太陽電池シートを、引っ張り力をモニタしつつ引き出し、パネル面に貼り付けるデリケートな作業に成功した。太陽電池によりLEDが発光することがハンドアイカメラで確かめられた。シートを収納する作業では、貼付位置が様々な要因の累積で不確定となるため、レーザー距離センサでシートグリップを走査して探索し、位置計測を自ら行い、把持と収納動作を行った。これはロボットにより太陽発電を実施した世界初の事例である。同様に、宇宙機器保守に必須な熱ブランケットの貼付、引き剥がし作業も実施した。



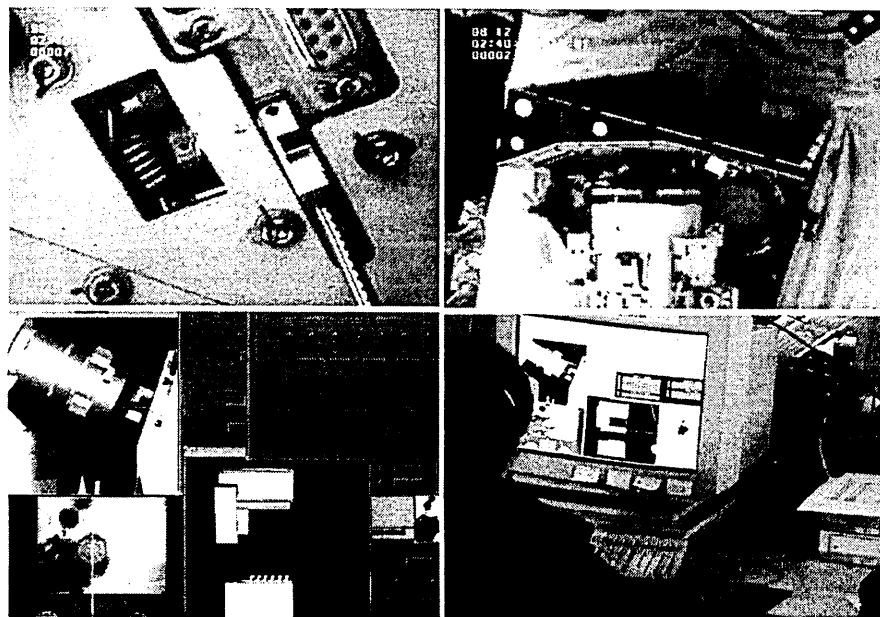
LED 太陽電池シート展開前（左：LEDパネル、右：ロボットハンド）



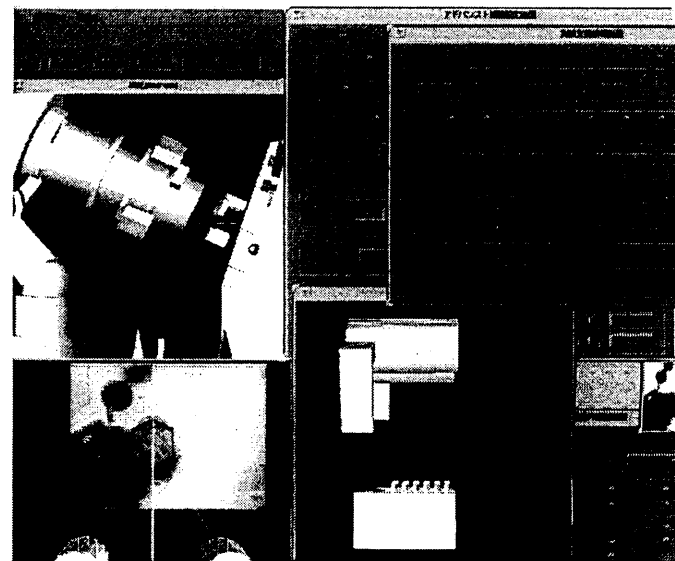
太陽電池シート展開後（展開した太陽電池によりLEDが発光している）

5. 6 遠隔教示実験

これまで行ってきた地上からの遠隔操作をさらに発展させたアドバンスド遠隔作業実験として、コンピュータグラフィックス(CG)の幾何モデルと宇宙から送られてきた実画像を用い、マウス操作によりデスクトップ上でロボットの作業軌道を「その場」教示し、実行させる実験を行った。この手法は、マウスによりCG上のロボット手先関心点をドラッグして作業軌道を教示し、CG上でプレビューし、安全が確認された作業軌道をその場で送信・実行する、シームレスな遠隔教示を可能とするものである。実画像がスーパーインポーズ表示され、実画像上での作業点の指示もできるため、直感的で確実な作業教示が容易にできる。ロボットへの作業教示をCGと実画像を併用して行っているため教示の確実性や効率が向上すること、教示された作業軌道を実行前にCG上でプレビューし安全性を確認できること、作業軌道を計算機に登録できるため編集・修飾・再生が容易なことなどから、打ち上げ後に宇宙のロボットに頻繁に行わせる作業が生じた場合の「その場」教示を効率的に行う方法として有効と考えられる。実証作業としてボルトの把持・回転操作を試み、円滑に教示・実行することができた。この手法を発展させれば、将来、インターネットを通し、いつでも、どこからでも、一般の人でも、容易に宇宙のロボットに仕事をさせることができるようになる。



マウスのドラッグ・ドロップによる遠隔作業教示

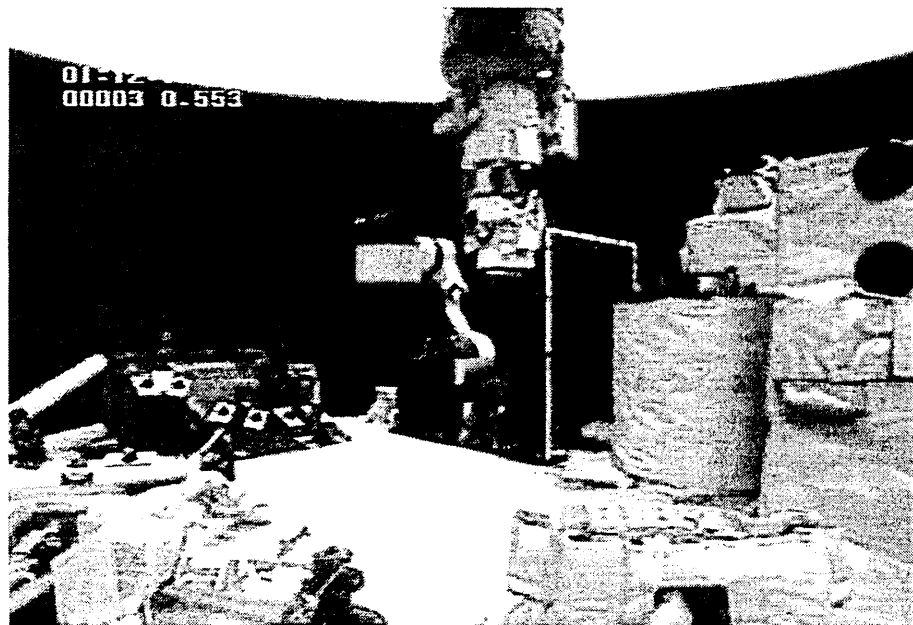


実カメラ画像と仮想カメラ画像の
スーパーインポーズ画面

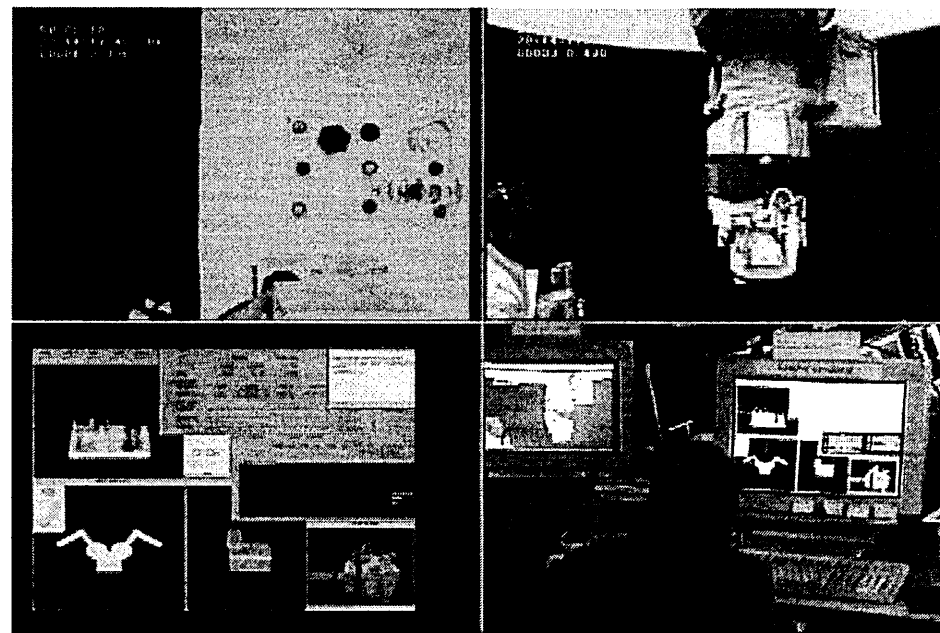
5. 7 「おりひめ」への軌道上サービス実験 (MITI/NASDA共同実験)

この実験はNASDAの2m級大型アーム(ERA)に高機能ハンドを取り付け、「おりひめ」に搭載した部品に対し精密作業を行うもので、NASDAとの共同実験として実施した。軌道上サービスでは広い作業エリアと精密な作業性の双方が要求される場合も多い。そのためには、高機能ハンドを軌道上で長いアームに装着し分離する技術と、長いアームに取り付けられたハンドを用い精密作業を行う技術の修得が重要であり、その基礎技術実験を行ったものである。

ERA先端のツールを高機能ハンドの把持フィクスチャに挿入し、機械的、電氣的結合を行った。このハンドを用い、「おりひめ」を材料実験衛星に見立て、試料の点検、取り出し、収納作業を行った。また、電気コネクタの着脱実験を行った。長いアームで精密部品をアクセスする場合、位置誤差が問題となる。そこで、手先カメラ、ハンドに取り付けた距離センサ、指の圧覚センサを用い作業対象の3次元位置精密計測を行った。宇宙でハンドを小型および大型の2種類のロボットに付け替え作業したこと、および、ドッキングした衛星への軌道上サービスは世界で初めての実績である。



軌道上で大型アームに結合された高機能ハンド



「おりひめ」への精密作業実験

(左上：手先カメラから見た「おりひめ」上の作業部品、右上：ハンド、
左下：シミュレータCG表示、右下：操作卓)

6. まとめ

ETS-VIIに搭載した高機能ロボットハンドの宇宙実験は、平成11年5月20日をもって定常段階の実験を終了した。この間、搭載機器は正常に機能し、以下の様な世界に先駆けた成果を得て所期の実験目的を達成した。

(1) 高機能ハンド実験装置の軌道上での再構成

- ・分離して打ち上げられたアームとハンドを軌道上で自ら結合し、作業形態に移行することに成功。

ロボットの一部を軌道上で交換したり、作業形態を変えるための基礎技術を修得

(2) 多重センサハンドを用いた自律制御による精密作業実験

- ・ハンドの3本指と多重センサ情報を用い自律的に精密作業させる実験を、電気コネクタの着脱、太陽電池セル展開、熱ブランケット展開などを通して実施。太陽電池セル展開では、ロボットによる発電実験に成功。

宇宙船外でサブミリの精度を要する精密作業をロボットで自律的に実施できることを実証

(3) 地上からの遠隔操作による精密作業実験

- ・地上から宇宙のロボットを遠隔操作し、電気コネクタの着脱、ボルトファスナの着脱、およびワイヤ配線作業を実施。コネクタは装着不良となったが、その経験を生かしフレキシブルなワイヤの配線など、難度の高い遠隔操作実験に成功。

地上から衛星間通信を経由して遠隔操作し、宇宙のロボットに精密作業を行わせうることを実証

(4) 遠隔操作と自律制御を融合させた精密作業実験

- ・遠隔操作と自律制御を融合し、地上の操作者と宇宙ロボットが協調して効率的に作業する手法をボルトファスナの着脱を通して実施。

地上の操作者と部分自律機能を有する宇宙ロボットが協調して精密作業を効率的に行う技術を修得

(5) 遠隔教示実験

- ・宇宙ロボットに地上からCGとマウスにより、作業軌道を「その場」教示する技術実験をボルトファスナの操作を通して実施。

地上から宇宙のロボットにインタラクティブ、かつ、臨機応変に作業を教示する技術を修得

(6) 「おりひめ」への軌道上サービス実験 (NASDAとの共同実験)

- ・宇宙開発事業団の2m級アームに高機能ハンドを装着し、「おりひめ」への軌道上サービスを、コネクタの着脱、材料実験模擬試料の点検・収納作業を通して実施。

大型アーム／ハンドの着脱技術、大型アームに装着したハンドによる精密作業技術を修得

「宇宙ロボット用高機能ハンド実験装置」の宇宙実験結果の概要

平成11年6月16日
通商産業省

1. プロジェクトの概要

通商産業省では将来の宇宙空間の産業利用を効率的に進めるための要素技術として、「宇宙ロボット用高機能ハンド実験装置」(ARH: Advanced Robotic Hand System)を開発し、宇宙開発事業団の技術試験衛星VII型(ETS-VII)に搭載し宇宙実験を行ってきた。このシステムは3指ハンドによる精密作業性と多数のセンサによる自律機能を有したロボットで、宇宙飛行士の手作業相当の精細作業の基礎技術修得を目指して開発を進めてきた。宇宙実験の目的は以下のとおりである。

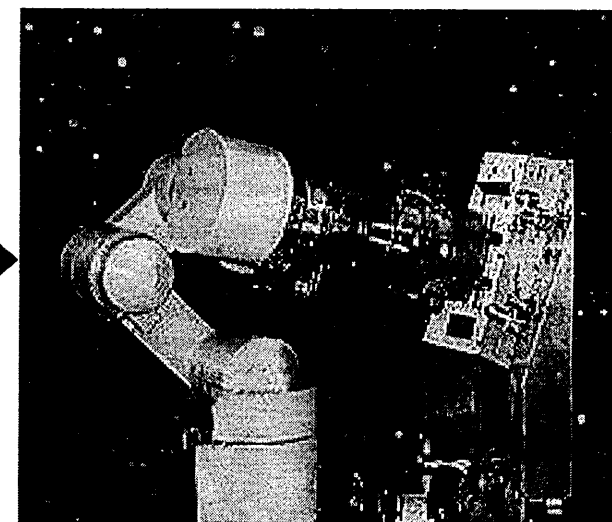
- 1) 多自由度、多重センサハンドの宇宙船外精密作業における有効性を検証すること
- 2) 地上から衛星間通信を経て宇宙のロボットに精密作業させる技術を修得すること
- 3) 宇宙の無重力や視覚環境でのロボットの高度制御技術を修得すること

本システムは1992年に予備設計を開始し、1996年5月にフライトモデルの製作を完了した。1997年11月28日にH-IIロケットにより打ち上げられ、4ヶ月の軌道上待機の後、1998年3月から宇宙実験を実施し、この度、定常段階の実験を終了した。

宇宙で精細作業を行うロボットは、これまで、ドイツが1993年にスペースシャトルでROTEXと呼ばれる船内ロボット実験を行ったが、これが1自由度グリッパのロボットによる有人スペースラブのラック内での数日の実験であったのに対し、本ロボットは過酷な宇宙船外での作業、3指ハンド(3自由度)による精密作業、1年半の長期実験、異種ロボットへのハンド結合による汎用利用、などが主な違いであり、世界初の無人宇宙機での精密作業ロボット実験である。



宇宙飛行士の手作業



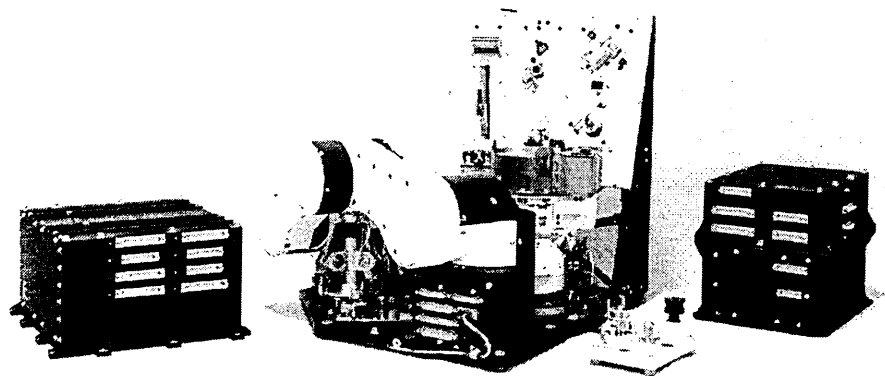
高機能ハンドによる軌道上精密作業
実験のイメージ

2. ロボットシステム

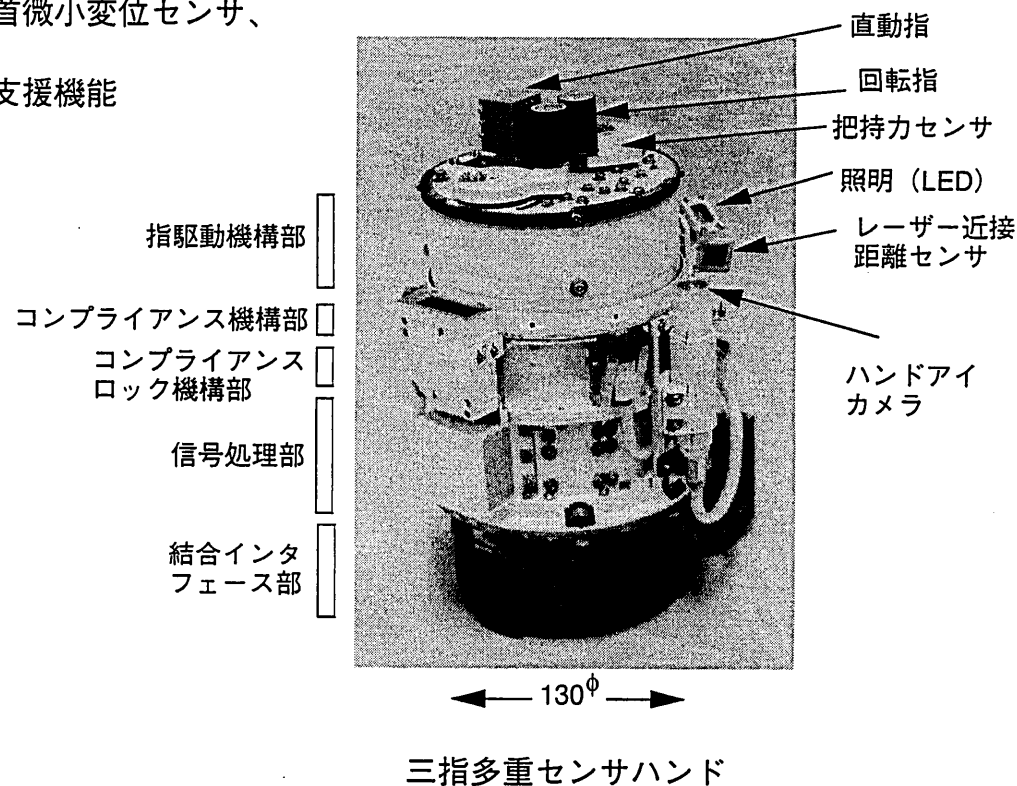
搭載ロボットシステムはハンド、小型アーム、タスクボード、制御計算機、電源装置から構成され、「ひこぼし」の地球指向面に搭載されている。また、ターゲット衛星（おりひめ）にはタスクパネルを搭載している。

このロボットの主な特徴は以下の通りである。

- 1) 3指ハンドによる精密作業性
 - ・親指に相当する直動指、人差し指と中指に相当する2本の回転指
 - ・柔軟な手首として機能するコンプライアンスリスト
 - ・数cmの幾何モデル誤差に対し、 $50\mu\text{m}$ の分解能の精密作業性を達成
- 2) 多数のセンサによる自律機能
 - ・ハンドアイカメラ、レーザービーム式距離センサ、手首微小変位センサ、指圧覚センサ、力・トルクセンサの階層的利用
- 3) センサ融合テレロボティクスによる地上からの遠隔作業支援機能



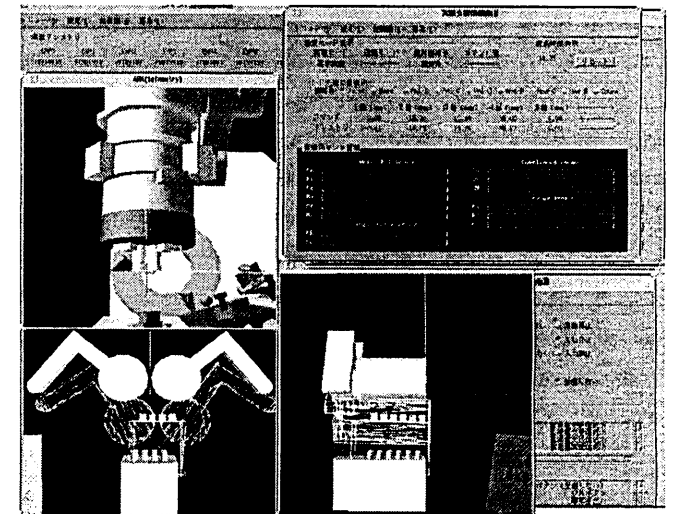
左から制御計算機、ロボット実験ステージ（折り畳まれた小型アーム、ハンド、タスクボード）、タスクパネル、電源装置



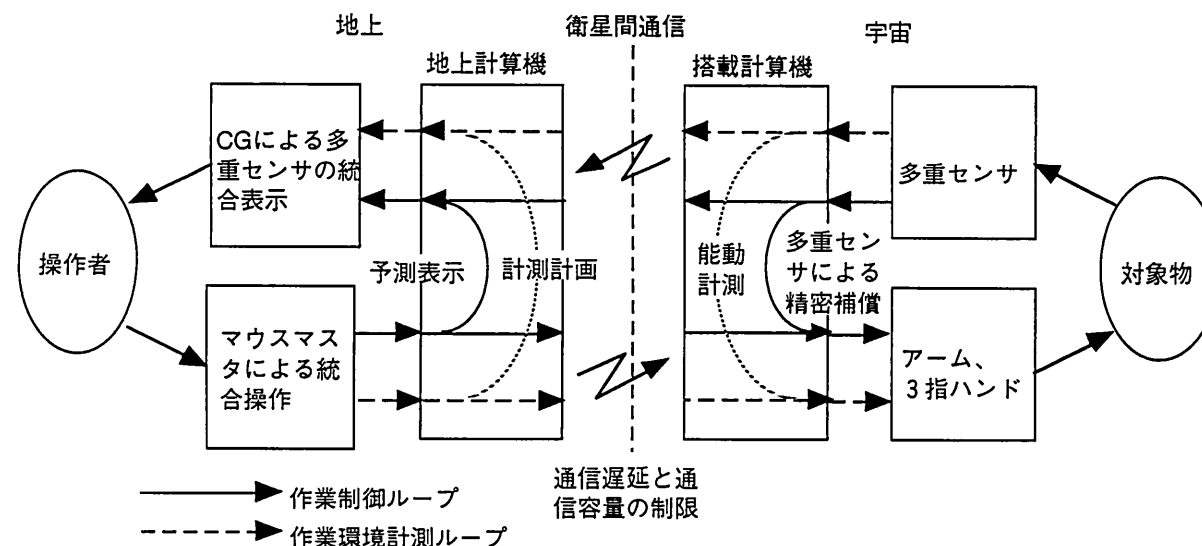
3. 遠隔ロボット運用システム： センサ融合テレロボティクス

遠く離れた宇宙のロボットを使役し精密作業を行わせるには三つの課題を克服する必要がある。第一は衛星間通信の制約のもとでの精密性の確保である。通信容量が少ないと高解像度の画像が地上で実時間で得られないため細部の遠隔操作は難しくなり、さらに通信遅延が大きいとその困難は著しく増す。第二は軌道上サービスは多くのタスクの積み重ねからなるが、その過程で位置誤差が累積するため、精密作業では従来の幾何モデルに基づく遠隔操作は困難となる。第三は作業空間の広い宇宙の精密作業では移動装置、腕、指等の多数の効果器の操作が必要となり、操作自由度とモニタするセンサが増し操作者の負担が増大する。

そのため、多重センサ情報を地上と宇宙の制御・処理ループで積極的に利用するセンサ融合テレロボティクスのアプローチをとった。第一の課題には、ハンドに配置した多重センサベクトル制御とハンドの精密調整機構で対応する。第二の課題には多重センサハンドを用いて能動的に作業環境を計測することより対応する。第三の課題には腕、指等への指示を統合してできるデスクトップ操作装置の採用と多重センサのテレメトリ情報をグラフィックシミュレータに多元的に可視化表示することにより克服している。



シミュレータの3次元CG画面



センサ融合テレロボティクスの構造



デスクトップ型遠隔操作装置

4. 宇宙実験項目

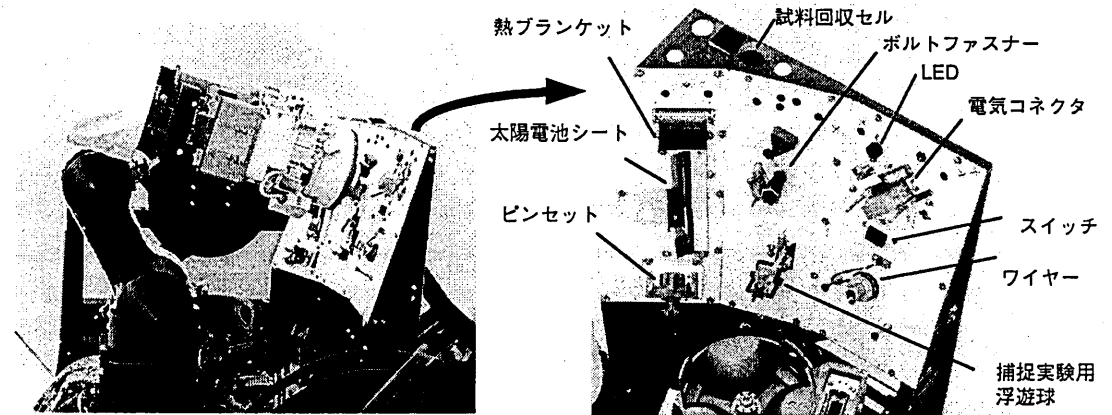
宇宙実験は、ハンドを小型アームに結合しタスクボードの部品に対し精密作業を行う単独実験と、NASDAのアーム（全長約2.4m）に結合しターゲット衛星のタスクパネルの部品に対しサービス作業を行うハンド／大型アーム結合実験の形態で実施した。

作業要素実験項目

- 1) 精密機器の保守に関する作業要素実験
 - ・コネクタ着脱
 - ・ボルトファスナ着脱
- 2) 宇宙エネルギー機器の保守に関する作業要素実験
 - ・太陽電池セル展開・収納
 - ・サーマルブランケット展開・収納
 - ・ワイヤ操作
- 3) 日陰期間の活用に関する作業要素実験
 - ・スイッチ操作
- 4) 微小重力材料実験に関する作業要素実験
 - ・試料点検、収納
- 5) ロボット要素の相互利用に関する技術実験
 - ・ハンド／大型アーム結合

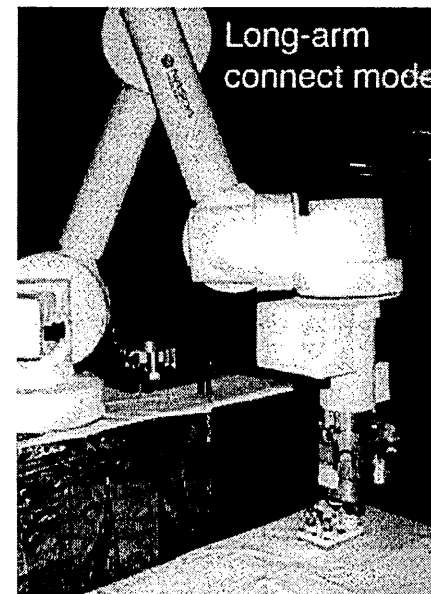
ロボティクスとしての技術実験項目

- ・多重センサを用いた自律精密制御技術
- ・地上からの遠隔操作による精密作業技術
- ・自律・遠隔融合による精密作業技術
- ・遠隔教示技術



タスクボード

単独実験のコンフィギュレーション

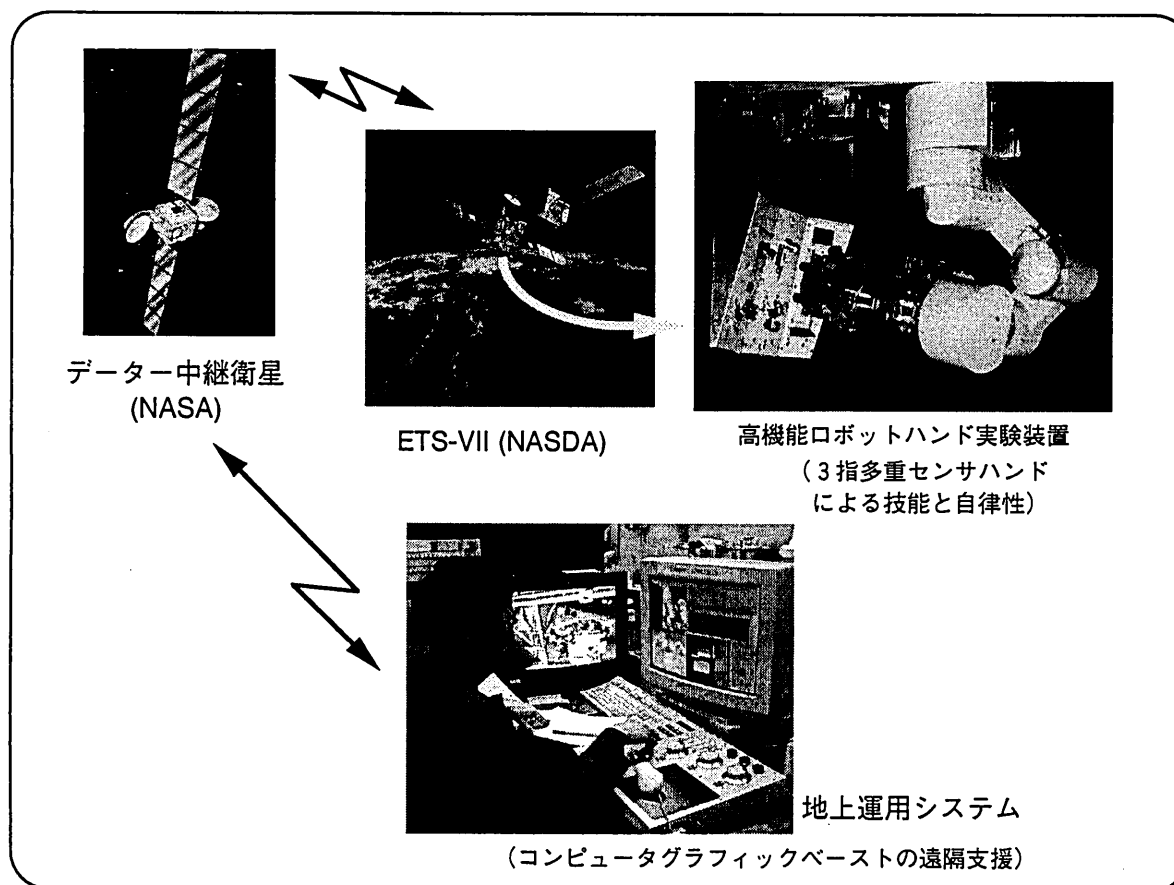


ハンド／大型アーム結合実験の
コンフィギュレーション
(MITI/NASDA共同実験)

5. 宇宙実験

5. 1 全体構成

上述の特徴を有するテレロボットを宇宙開発事業団の衛星「ひこぼし」に搭載し、同事業団の協力を得て宇宙実験を実施した。ロボットは高度550km、軌道傾斜角35度の円軌道を1周約96分で周回する衛星の地球指向面に搭載されている。運用は筑波宇宙センターに設置したロボット地上運用系から行う。コマンドデータは、同センターからデータ中継衛星(TDRS)の運用を行うNASAのGoddard Space Flight Centerに有線で送られ、さらにWhite Sandsの地上局に送られる。ここから静止軌道にあるTDRSに電波で送信され、衛星間通信で「ひこぼし」に中継される。受信されたコマンドは衛星データ処理系からロボット制御計算機に送られ制御が行われる。テレメトリデータは逆の経路を通り、空間的に巨大な制御ループを形成している。1巡の通信時間遅れは約5秒である。



宇宙実験システムの構成

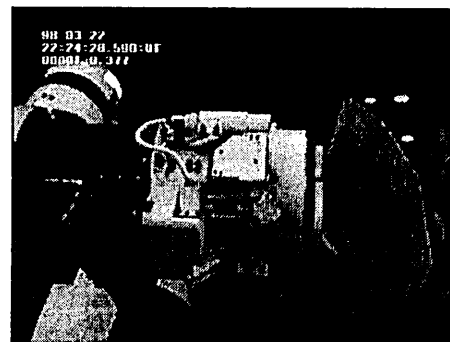
5. 2 ロボットシステムの軌道上再構成

実験システムは約4カ月の軌道上待機の後、1998年3月22日から3月26日にかけて、初期機能点検を実施した。最もクリティカルなイベントは、アームを打ち上げ時の固定機構から解放し、軌道上でハンドを結合して作業可能な形態に再構成することであった。アームとハンドは打ち上げ時の振動（ランダム20g）と衝撃（1000g）に耐えるため分離してクランプ機構で剛に固定されているが、予圧した金属接触面の打ち上げ時の激しい動荷重による凝着、周回軌道での1700回を超える熱サイクルによる超高真空中のコールドウエルディングなど、地上試験では確認困難な部分があり、解放が正常に行われるかが第一関門であった。「解放タスク」の起動により、手先、肘、手首の固定機構が解除された。アームとハンドの結合は、ハンドへの精密嵌合や宇宙環境で電子機器間の電気結合が正常に行われるかがポイントであったが、力制御によりハンド結合部にアーム先端が挿入され、ツールによりハンドが結合され、作業形態への移行に成功した。

これは宇宙でロボットアームがハンドを自ら取り付けた最初の事例である。この再構成の技術は、将来、ロボットが体の一部を交換したり、合体などにより軌道上で作業形態を変えるための基礎技術にもなる。



アーム先端
ハンド結合インターフェース
軌道上初期状態



作業形態への移行
(ハンド、アームの固定機構の解放、アームとハンドの結合、作業部品の打ち上げ固定機構の解除をロボットが自ら実施)

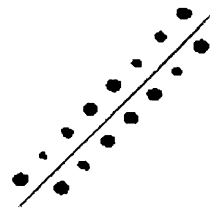
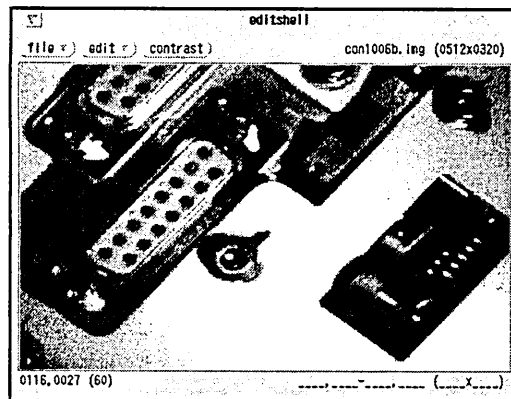


軌道上で作業形態に再構成されたロボット
(上は地球)

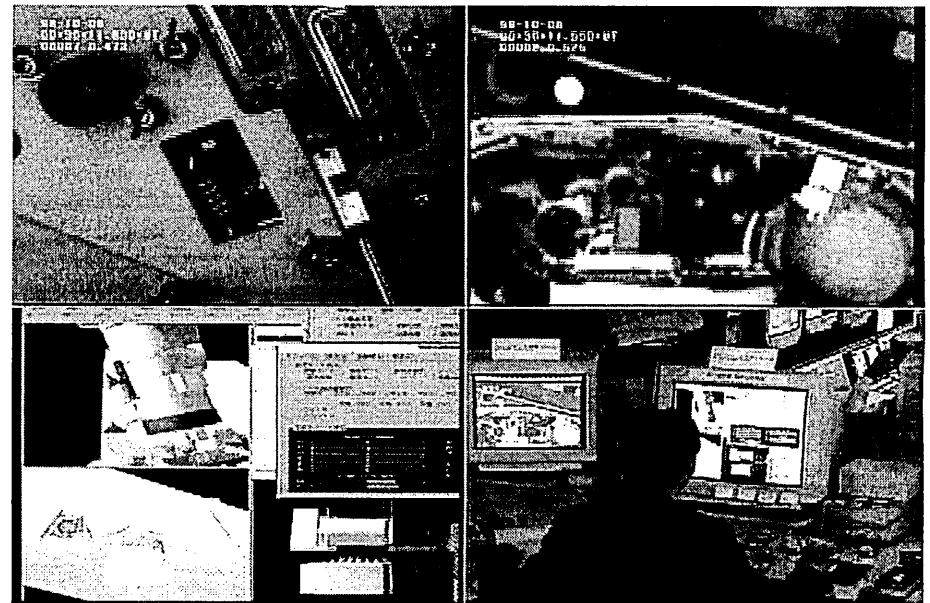
5. 3 多重センサ融合による精密作業実験

電子機器交換を行う際に特に精密さを要求される定形作業の代表として、電気コネクタ着脱を実施した。コネクタは多ピンであることとレセプタクルのガイドが狭いため、サブミリの精度で合わせて挿入する必要がある。ここでは、ハンドの多重センサを駆使して自律的にサブタスクを実行し、地上の監督者に結果の報告と次のサブタスクの続行の許諾を仰ぎながら作業を進めるスーパーバイザリー制御で運用した。ハンドの距離センサとカメラ画像情報を融合して局所作業座標系を生成し、レセプタクルの位置と傾きをピン配列の画像処理により同定し、指の圧覚と手首への力の加わり具合をロボット自ら判断しながらコネクタの脱着を実行し、作業を完了した。同様の作業を遠隔操作で行ったが、グラフィックシミュレータのCG画像と実世界の位置関係にずれが生じ、操作者の誤判断を誘い、結合不良となった。

また、地上から遠隔操作を効率的に行うため、自律制御と融合して操作する手法をボルトファスナの着脱作業で評価した。これは材料実験の試料や機器交換の際に必要な作業要素の一つであるが、精密な中心軸合わせ、ネジのソフトな回転かみ合わせ、かみ合わせが正常に行われているかの判断が必要なほか、ねじ込み時は回転と並進動作を同時に行う必要があり、作業能力を評価する上からも適当なタスクである。手首の力センサ、変位センサ、指の関節角、指の圧覚などのセンサ情報を総合的に用いたセンサ融合制御と、自由度を選択的に遠隔操作する手法をシェアし、効率的に作業できることが示された。操作デバイスとしてはアームや指の動きを統合的に操作でき、かつコンピュータグラフィックスでの指令に適したマウス型マスタを開発して用いた。このような融合手法で、従来の遠隔操作に比し効率の良い遠隔作業ができることを示した。



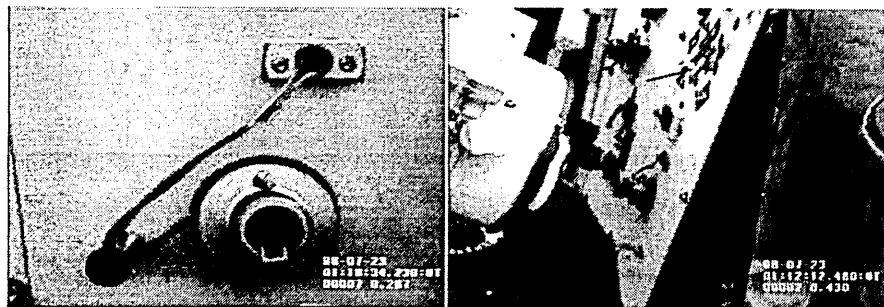
日陰での自律制御によるロボット作業
(LEDライトによるコネクタ画像と画像処理による位置計測例)



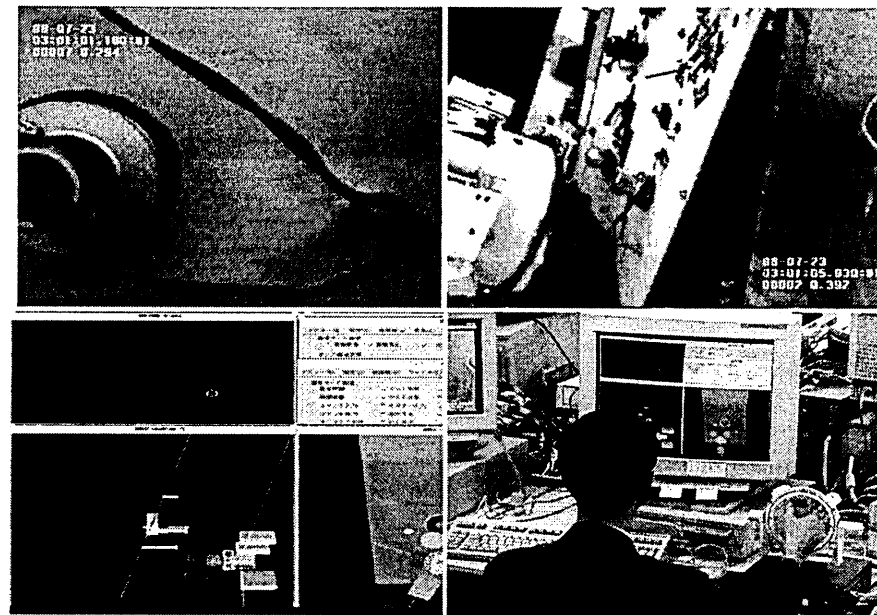
遠隔・自律融合操作によるボルトファスナの着脱実験

5. 4 ワイヤ操作実験（地上から宇宙のワイヤを配線する）

地上からの遠隔操作実験としてワイヤ操作を行った。これは、機器保守の際の配線を想定したもので、ペグに巻いてある電線を釘状のリールに掛け替える作業である。ワイヤがフレキシブルで形状が不規則に変わるため幾何モデルに依存した自律制御では困難なタスクで、人間の技能を遠隔操作でロボットに実時間で伝達する必要がある。ここでは、コンピュータグラフィックスでの予測表示と搭載制御計算機での操作入力修飾機能により通信遅延を補償する方法を用いて、従来の少し動かしては止めて待つ「ムーブ・アンド・ウェイト法」の操作効率を改善し、掛け替え作業に成功した。遠隔操作の様子と、ワイヤ掛け替え前後の写真を下図に示す。これは地上から無人宇宙機のロボットを遠隔操作した世界で最初の作業実験である。



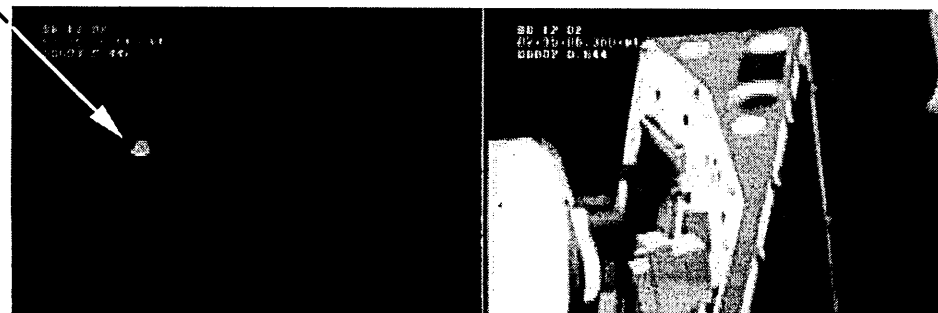
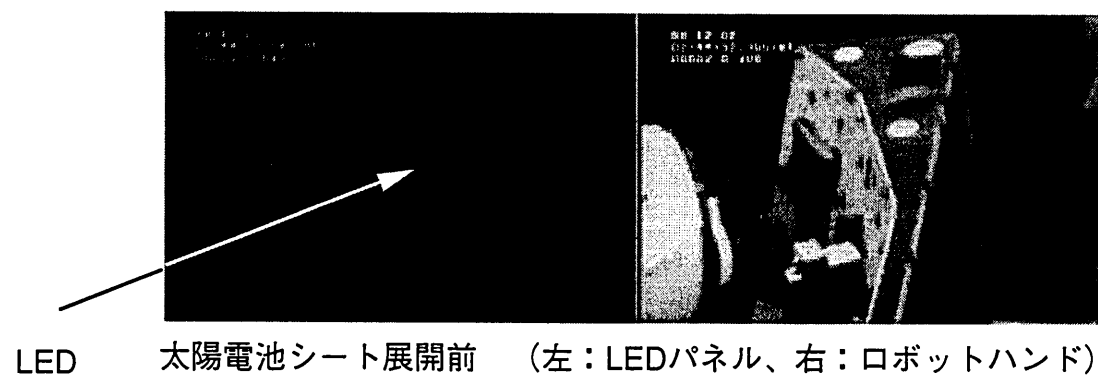
作業前（左：ワイヤとペグ、右：ハンド近傍画像）



遠隔操作後（左上：ワイヤとペグ、右上：ハンド近傍画像、
左下：CG予測画像、右下：操作卓）

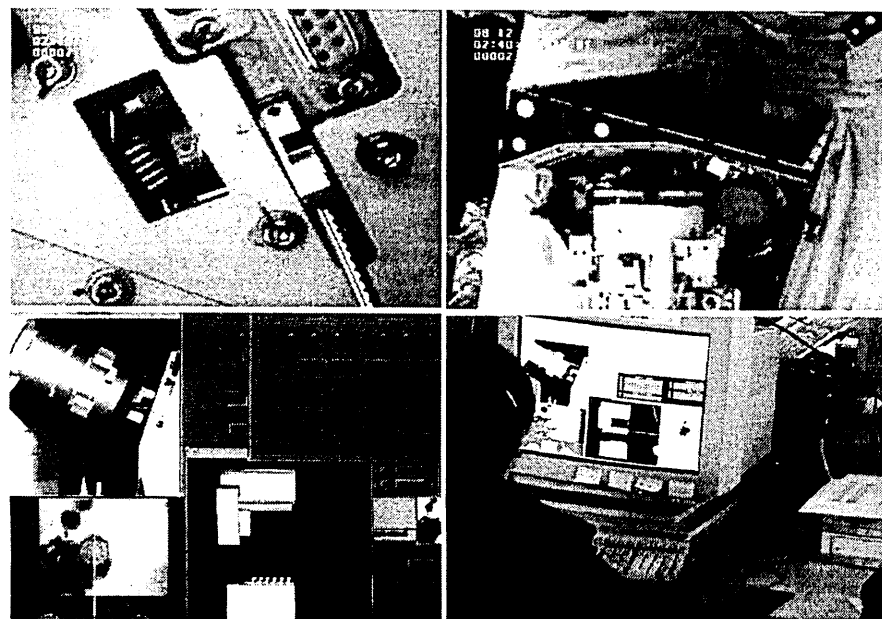
5. 5 太陽電池セル展開実験（太陽電池を張り付け、発電する）

将来の衛星の太陽電池や熱ブランケットなどの柔軟材料の保守の基礎技術を得るため、シート状の太陽電池の展開、貼り付け、発電確認、収納の一連の作業実験を行った。スーパーバイズド自律制御により、ドラムに収納された太陽電池シートを、引っ張り力をモニタしつつ引き出し、パネル面に貼り付けるデリケートな作業に成功した。太陽電池によりLEDが発光することがハンドアイカメラで確かめられた。シートを収納する作業では、貼付位置が様々な要因の累積で不確定となるため、レーザー距離センサでシートグリップを走査して探索し、位置計測を自ら行い、把持と収納動作を行った。これはロボットにより太陽発電を実施した世界初の事例である。同様に、宇宙機器保守に必須な熱ブランケットの貼付、引き剥がし作業も実施した。

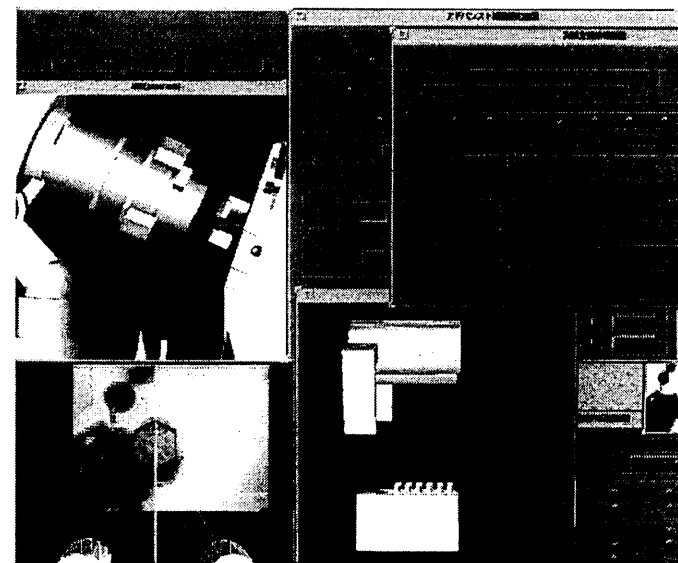


5. 6 遠隔教示実験

これまで行ってきた地上からの遠隔操作をさらに発展させたアドバンスド遠隔作業実験として、コンピュータグラフィックス(CG)の幾何モデルと宇宙から送られてきた実画像を用い、マウス操作によりデスクトップ上でロボットの作業軌道を「その場」教示し、実行させる実験を行った。この手法は、マウスによりCG上のロボット手先関心点をドラッグして作業軌道を教示し、CG上でプレビューし、安全が確認された作業軌道をその場で送信・実行する、シームレスな遠隔教示を可能とするものである。実画像がスーパーインポーズ表示され、実画像上での作業点の指示もできるため、直感的で確実な作業教示が容易にできる。ロボットへの作業教示をCGと実画像を併用して行っているため教示の確実性や効率が向上すること、教示された作業軌道を実行前にCG上でプレビューし安全性を確認できること、作業軌道を計算機に登録できるため編集・修飾・再生が容易なことなどから、打ち上げ後に宇宙のロボットに頻繁に行わせる作業が生じた場合の「その場」教示を効率的に行う方法として有効と考えられる。実証作業としてボルトの把持・回転操作を試み、円滑に教示・実行することができた。この手法を発展させれば、将来、インターネットを通し、いつでも、どこからでも、一般の人でも、容易に宇宙のロボットに仕事をさせることができるようになる。



マウスのドラッグ・ドロップによる遠隔作業教示

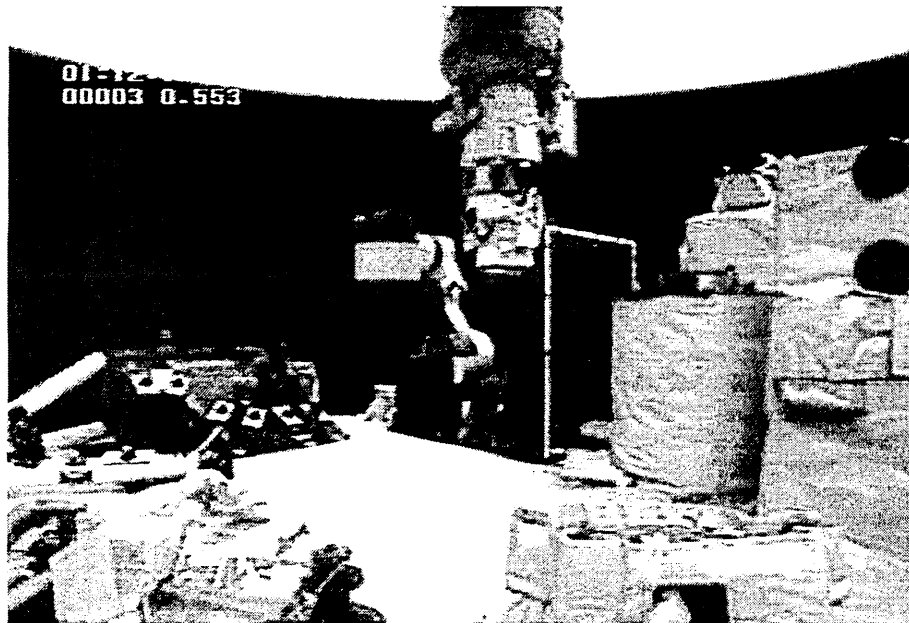


実カメラ画像と仮想カメラ画像の
スーパーインポーズ画面

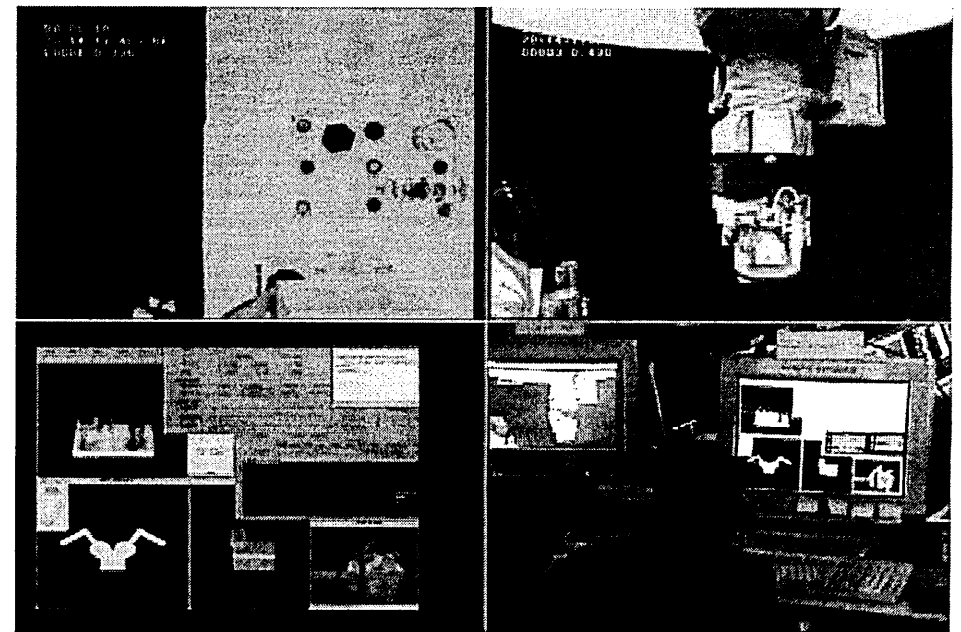
5. 7 「おりひめ」への軌道上サービス実験 (MITI/NASDA共同実験)

この実験はNASDAの2m級大型アーム(ERA)に高機能ハンドを取り付け、「おりひめ」に搭載した部品に対し精密作業を行うもので、NASDAとの共同実験として実施した。軌道上サービスでは広い作業エリアと精密な作業性の双方が要求される場合も多い。そのためには、高機能ハンドを軌道上で長いアームに装着し分離する技術と、長いアームに取り付けられたハンドを用い精密作業を行う技術の修得が重要であり、その基礎技術実験を行ったものである。

ERA先端のツールを高機能ハンドの把持フィクスチャに挿入し、機械的、電氣的結合を行った。このハンドを用い、「おりひめ」を材料実験衛星に見立て、試料の点検、取り出し、収納作業を行った。また、電気コネクタの着脱実験を行った。長いアームで精密部品をアクセスする場合、位置誤差が問題となる。そこで、手先カメラ、ハンドに取り付けた距離センサ、指の圧覚センサを用い作業対象の3次元位置精密計測を行った。宇宙でハンドを小型および大型の2種類のロボットに付け替え作業したこと、および、ドッキングした衛星への軌道上サービスは世界で初めての実績である。



軌道上で大型アームに結合された高機能ハンド



「おりひめ」への精密作業実験

(左上：手先カメラから見た「おりひめ」上の作業部品、右上：ハンド、
左下：シミュレータCG表示、右下：操作卓)

6. まとめ

ETS-VIIに搭載した高機能ロボットハンドの宇宙実験は、平成11年5月20日をもって定常段階の実験を終了した。この間、搭載機器は正常に機能し、以下の様な世界に先駆けた成果を得て所期の実験目的を達成した。

(1) 高機能ハンド実験装置の軌道上での再構成

- ・分離して打ち上げられたアームとハンドを軌道上で自ら結合し、作業形態に移行することに成功。

ロボットの一部分を軌道上で交換したり、作業形態を変えるための基礎技術を修得

(2) 多重センサハンドを用いた自律制御による精密作業実験

- ・ハンドの3本指と多重センサ情報を用い自律的に精密作業させる実験を、電気コネクタの着脱、太陽電池セル展開、熱ブランケット展開などを通して実施。太陽電池セル展開では、ロボットによる発電実験に成功。

宇宙船外でサブミリの精度を要する精密作業をロボットで自律的に実施できることを実証

(3) 地上からの遠隔操作による精密作業実験

- ・地上から宇宙のロボットを遠隔操作し、電気コネクタの着脱、ボルトファスナの着脱、およびワイヤ配線作業を実施。コネクタは装着不良となったが、その経験を生かしフレキシブルなワイヤの配線など、難度の高い遠隔操作実験に成功。

地上から衛星間通信を経由して遠隔操作し、宇宙のロボットに精密作業を行わせうことを実証

(4) 遠隔操作と自律制御を融合させた精密作業実験

- ・遠隔操作と自律制御を融合し、地上の操作者と宇宙ロボットが協調して効率的に作業する手法をボルトファスナの着脱を通して実施。

地上の操作者と部分自律機能を有する宇宙ロボットが協調して精密作業を効率的に行う技術を修得

(5) 遠隔教示実験

- ・宇宙ロボットに地上からCGとマウスにより、作業軌道を「その場」教示する技術実験をボルトファスナの操作を通して実施。

地上から宇宙のロボットにインタラクティブ、かつ、臨機応変に作業を教示する技術を修得

(6) 「おりひめ」への軌道上サービス実験 (NASDAとの共同実験)

- ・宇宙開発事業団の2m級アームに高機能ハンドを装着し、「おりひめ」への軌道上サービスを、コネクタの着脱、材料実験模擬試料の点検・収納作業を通して実施。

大型アーム／ハンドの着脱技術、大型アームに装着したハンドによる精密作業技術を修得