

宇宙における精密テレロボティクスの実証試験

Demonstration Test of Precise Telerobotic System in Space

町田 和雄 戸田 義継 秋田 健三
K. MACHIDA Y. TODA K. AKITA

This paper presents the space test of the ARH (Advanced Robotic Hand System), which is the world's first precise extravehicular robot aboard the satellite "Hikoboshi". The telerobotic system has features of dexterity, autonomy and flexible operability, using a three-finger multisensory hand at a work site in space and a computer graphics-based desktop interface at an operation site on the ground. The concept of sensor-fused telerobotics utilizing multisensory information is introduced, and the system is implemented to perform high precision tasks under the barrier of inter-satellite space communication. The robot system was launched into low earth orbit, and the capability of sensor-fused telerobotics was demonstrated in precise in-orbit servicing.

§ 1 はじめに

宇宙空間の利用が大規模化、多様化するに伴い、危険な宇宙船外で人間に代わり精密作業を行うロボットが求められてくる。現状の宇宙船外ロボットは、ペイロードに付けた大きなフィクスチャをツールでつかんで運搬し、設置場所の結合機構で固定してもらうもので^{1,2)}、部品を扱う精密作業性を持つに到っていない。

宇宙船内の精密ロボット実験として ROTEX が知られている³⁾。このロボットはスペースラブのラック内に格納され動作するもので、宇宙環境に曝される船外では使用できない。また、有人システムの一部として組込まれており、人間の介助が必要で、完全無人化されたシステムになっていない。さらに、エンドエフェクタは1自由度グリッパなので作業対象に把持フィクスチャを要するなどの制約があった。

著者らは宇宙船外で精密作業を行うテレロボットを開発し^{4,5)}、技術試験衛星 VII 型(ETS-VII)において宇宙実験を行った。このロボットは宇宙暴露環境で作業可能なこと 3 指多重センサハンドによる多様な精密作業性を有すること、衛星搭載機器として完全無人化され

ていること、船外作業の多様性に対応するため他のロボットアームへハンドを結合して精密作業が可能なのが特徴であり、無人宇宙船外で精密作業を行うテレロボットとしては世界最初のものである。本論文ではこのロボットによるセンサ融合テレロボティクスの宇宙実験結果について報告する。

これまでテレロボティクスについては、遠隔操作における通信時間遅れや通信容量の制限に対処するため予測表示⁶⁾、仮想モデル⁷⁾、自律・遠隔融合^{8,9,10)}など、多数の研究が行われてきている¹¹⁾。これらの多くは遠隔作業における操作者の負担の軽減や効率化に重点が置かれており、精密作業の視点からの研究や実施例は少ない。実際、上に挙げた手法は正確な幾何モデルを必要とし、その精度により適用しうる作業が制限される。我々は通信遅延と通信容量の制限のもとで精密作業を安全・確実に実行するには、多数の局所センサ情報を融合したテレロボティクス手法が重要であるとの認識から、3 指多重センサハンドを有するロボットを開発し、宇宙におけるセンサ融合テレロボティクスの実証実験を行った。本論文ではまずセンサ融合テレロボティクスの概念を述べ、次に技術試験衛星を用いた宇

宙実験システムについて記述する。次いで、宇宙実験の結果として、多重センサによる計測性能、およびセンサ融合テレロボティクスによる軌道上精密作業実験の結果と評価を述べる。

§ 2 センサ融合テレロボットシステム

2.1 センサ融合テレロボティクスの概念

テレロボティクスは Fig.1の(a)に示すように、操作側と遠隔地の作業側における制御・処理ループを強化し、自律制御と遠隔操作をシェアして遠隔地にあるロボットを効率的に使役する技術の概念である¹¹⁾。これを宇宙の精密作業に適用するには三つの課題に対応する必要がある。第一は衛星間通信の制約のもとでの精密作業性の確保である。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る。また、通信遅延が長くなれば遠隔操作性が低下するが、精密作業ではその困難は著しく増大する。実際、我々の経験では10mm程度の案内を設けた軌道上交換装置(ORU: Orbit Replaceable Unit)の着脱は10秒程度の遅延でも予測表示法で遠隔操作は容易だが、構造上このような案内が付けられないサブミリの調整を要する精密部品では極めて困難である。第二は軌道上サービスは多数の作業の積み重ねからなる場合が多いが、その過程で幾何モデルの誤差が累積するため、精密作業では従来のモデルベースの遠隔操作の

適用は困難となる。また、打上後の軌道上の作業環境は、変化したり、不具合などの予測できない状態になることもある。これに対応できることが、将来の宇宙ロボットに求められるフレキシビリティである。第三は作業空間の広い宇宙の精密作業では移動装置、腕、指等のマクロからマイクロ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。

これらの課題に対応するため、作業側の先端効果器として多重センサを有したハンドを用い、そのセンサ情報を操作側と作業側のループで積極的に利用するアプローチをとる。すなわち、第一の課題に関しては、ハンドに配置した多重センサベース制御とハンドの精密調整機構で対応する。第二の課題に関しては、多重センサハンドを利用し、地上の人間とインタラクティブに作業環境の計測、調査を行う能動的なセンシングで対応する。第三の課題に関しては、多数の効果器の指示が統合してできる操作デバイスの採用と多重センサのテレメトリ情報のグラフィックシミュレータへの統合的可視化表示で対応する。これらを模式的に描くと Fig.1の(b)のようになる。ここで点線は多重センサによる作業環境計測の流れを示し、操作側では計測計画、作業側では能動センシングのループを構成する。このアプローチは、テレロボティクスの概念の軌道上精密作業に対する適用であり、多重センサ情報の多元的利用をキーとしていることから、センサ融合テレロボ

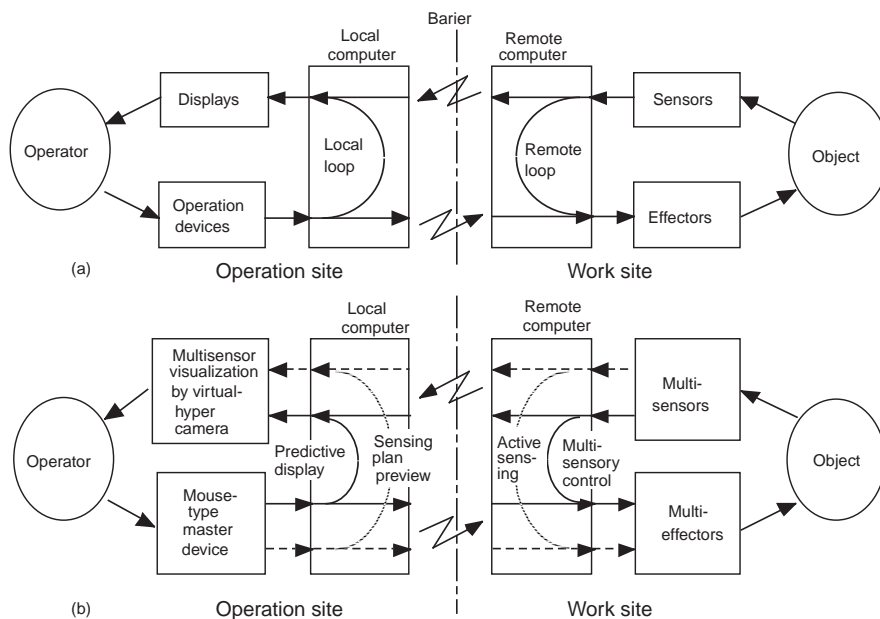


Fig.1 Structure of telerobotics (a: Sheridan's concept, b: Proposed concept of sensor-fused telerobotics)

ティクスと呼ぶ。以下に個々の具体化について述べる。

2.2 多重センサハンドによる精密補償

第一の課題に対応するため、Fig.2 に示す三指多重センサハンドを開発した¹²⁾。このハンドは、親指に相当する直動指と中指，人差し指に相当する二本の回転指からなる指機構を用いており(Fig.12左図において、直動指Aと回転指B、Cが矢印方向に開閉)，各指に1自由度を与え精密位置補償と把持力制御ができるようにした。また、指機構モジュールを板バネによるコンプライアンス機構で支持し、柔らかい手首として働くようにした。このコンプライアンス機構は、x、y、z方向に ± 1.5 [mm]，z軸回りに 2[deg]変位でき、挿抜作業時などに先端位置と回転誤差を吸収したり、衝撃を緩和するために用いる。

ハンド周りには非接触センサとしてハンドアイカメラと近接距離センサを、接触センサとして、力・トルクセンサ、手首コンプライアンスセンサ、指圧覚センサを配置した。ここでハンドアイカメラの軸は、ハンド中心軸と平行に取り付けている。近接距離センサは、レーザービームの反射スポットをPSDで検出し三角測量で距離計測する方式で、ハンド中心軸と平行に3個を外周に当配している。手首コンプライアンスセンサは、コンプライアンス機構の板バネに張り付けた歪みセンサで微小変位を検出する。指圧覚は回転指のリンクに張り付けた歪みセンサで検出する。

これらのセンサを用いて精密作業に必要な制御を

行った。Fig.3 にその基本戦略を示す。一般にロボット作業の多くは、物体の探索、物体位置の計測・同定、ハンドの移動、物体把持、物体操作のフローからなるサブタスクの繰り返しとみなすことができる。そこで各作業要素にセンサ情報を融合して自律性を向上させる。まず、ハンドアイカメラとレーザー式距離センサを走査して物体を探索して大まかな位置を見積もり、次にハンドアイカメラの画像および距離センサの精走査による非接触センサベースの位置計測を行う。次にその値をもとに外部モニタカメラと力・トルクセンサによる監視のもとで相対移動を行う。次に、力・トルクセンサ、手首コンプライアンスセンサ、指圧覚センサを

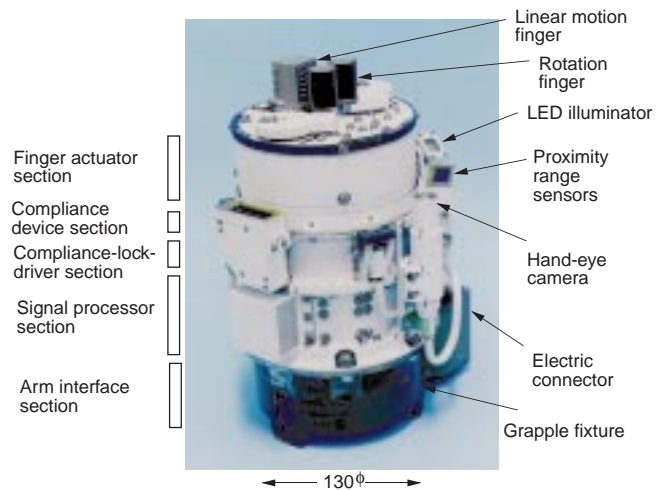


Fig.2 Three-finger multisensory hand

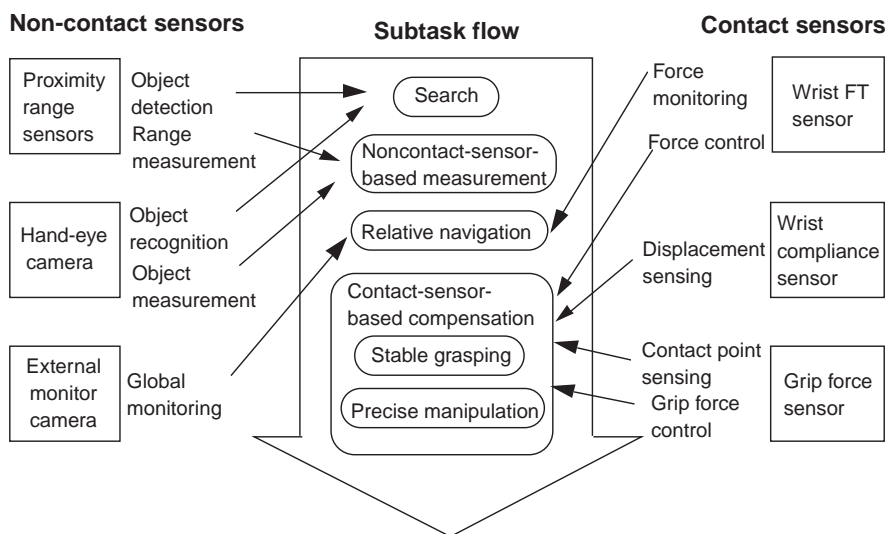


Fig.3 Basic strategy for precise task execution using multisensors

用い、非接触センサに含まれる誤差を補償しながら、把持し、これらの力情報を総合的に用いて物体の接触作業を行う。これらの基本機能を API 関数として登録し、タスクに応じて利用する。

2.3 作業環境計測

第二の課題に対応するためハンドの多重センサを用い、地上から作業環境計測を行う。これは不確かな状況で行うものであるため、ロボットと操作者が共通の認識や理解を持つようにすることが必要であり、更新された作業環境モデルに基づく指令の誤りも少なくなる。そのため、測定された作業環境情報は、人間に直感的でわかりやすく提示する必要がある。操作者はグローバルな鳥瞰像の他にクローズアップされた正面像、断面像があると正確な指示がしやすい。そこでFig.4に示す基本戦略を用いる。すなわち、ハンドアイカメラの軸を作業面に垂直に向け正面像を得る。カメラ軸の垂直化は、3個の距離センサによる制御で実行する。この時、距離が明らかとなるため正面図のスケールも確定できる。断面図をハンドアイカメラで得ることは、多くの場合カメラアングルの制約から不可能である。そこで、近接距離センサで作業環境を走査して奥行きを測定し疑似断面を得る。さらに、指による接触センシングにより非接触センサによる計測の不確定性を排除する。ここで、指は測長ゲージとして働く。また、接触力に対する変位を測定し、対象物の剛性や固定剛性などを推定する。

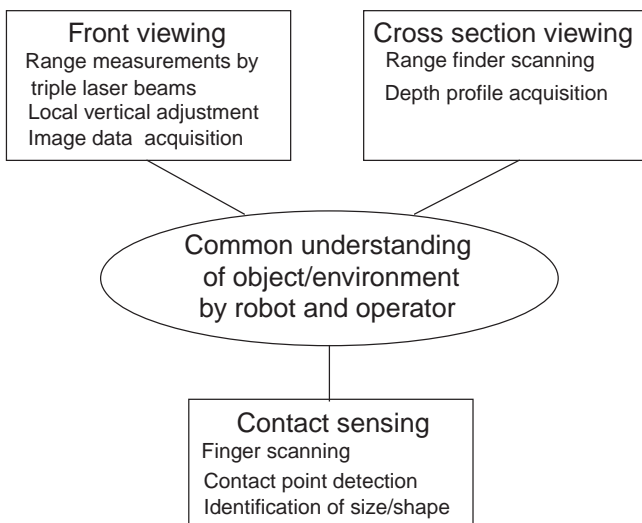


Fig.4 Basic strategy for work-environment measurement

2.4 デスクトップ型操作インターフェース

第三の課題に対応するため、地上運用系では、多数の効果器の操作と多数のセンサ情報のモニタを卓上で統合的に行えるデスクトップ型マン・マシン・インターフェースを構築した。

2.4.1 操作装置

一般に、操作デバイスはロボット先端の空間位置決めをするため、3次元的に移動可能な機構をとるが、操作の間、腕を空間に保持する必要があり、腕が疲れるという問題がある。衛星上のロボットを遠隔操作する場合、操作者は衛星に設置されたモニタカメラやシミュレータのコンピュータグラフィックス(CG)画像を利用するが、これらは2次元像であるため、画像平面内と奥行きを2方向を一度に指令するのは、衝突する危険があり好ましくない。安全を重視する宇宙の遠隔作業では、アームを対象物の真上に移動し、そこから垂直に接近する操作の繰り返しで行うのがほとんどである。また、宇宙の精密作業では移動装置、腕、指などの多数の効果器の操作が必要となるが、それぞれの操作デバイスを配置すれば操作性が悪化する。

これらのことから、先端位置決めと指操作を統合でき、操作者が常に腕を卓上に休められ、かつ、2次元画像上での指令というCGベースの操作環境に適した操作デバイスを開発した。これはFig.5に示すように、マウス型マスタと操作ボックスからなる。

マウス型マスタは通常のマウスの先端部分に指の開閉ボタンを付加したものである。操作者はロボットの

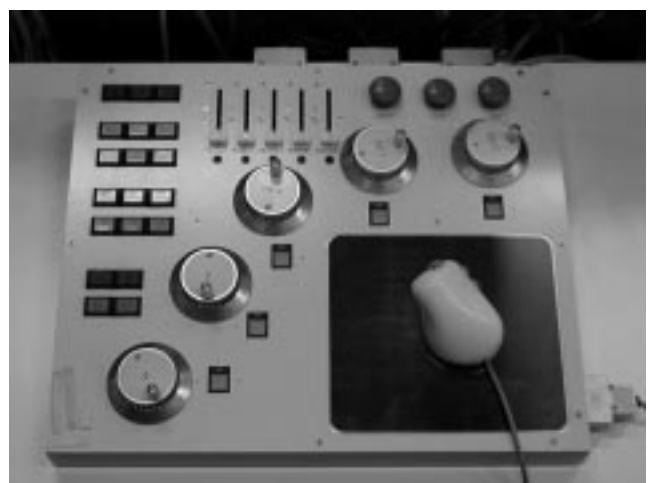


Fig.5 Desktop operation device (Mouse-type master and operation box)

作業内容に応じて選択した座標系の2つの座標成分を指令する。この時、選択した座標系に対応するシミュレータ画像、あるいは実画像を操作者に提示することにより、操作者の指令動作とロボットの画面上での動きを同調させ、違和感をなくする。対象物近傍では、Fig.6に示すようにディスプレイ上の三指近傍の正面図と側面図に対応する操作平面座標系(a),(b)を選択し、ハンドの先端位置をそのディスプレイ上で目的の位置まで移動させる。試作したマウス型マスタの遠隔操作評価実験を行った。4個の穴の連続ペグ挿入作業を5名の被験者で行った結果、40分程度の訓練により学習曲線が飽和し、操作能率の個人差もほとんどなくなる結果が得られた¹³⁾。学習曲線が短時間で収束するのは、パソコンでのマウスによる図形操作と同様の感覚でロボット操作ができることが大きな要因と考えられる。

操作ボックスはマウス型マスタの操作座標系の指定やCG画像の視点の選択を行うスイッチと、ロボットの指定座標でのアーム各軸方向の移動量や関節角の単軸指令を行うジョグダイヤル、およびマウス型マスタやジョグダイヤルのゲインを変更するボリューム、緊急停止ボタン等からなる。通常の使い方として、ハンドの並進位置決めにはマウス型マスタを、手首の姿勢・回転指令にはジョグダイヤルを用いることを前提に設計した。

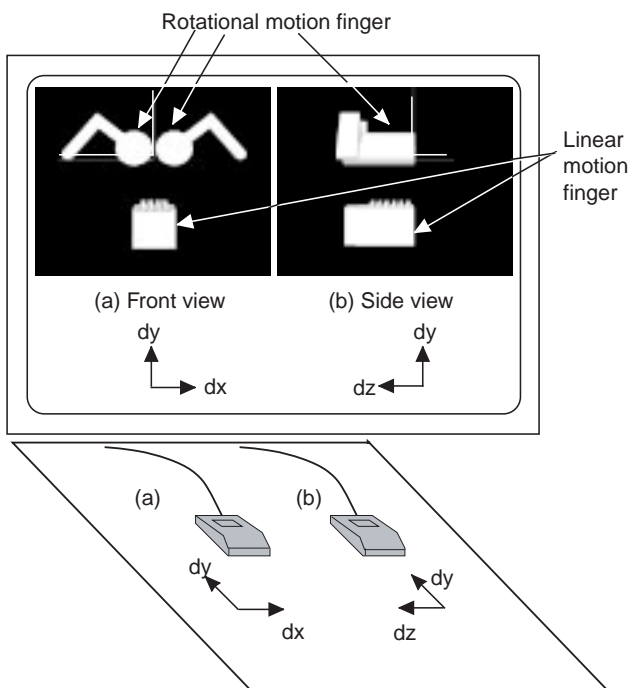


Fig.6 Operation using mouse-type master device

2.4.2 提示装置

多重センサのテレメトリ情報には、グラフィックシミュレータへの統合的可視化表示で対応した。ここでは、ロボットの作業状態を直感的に把握しやすいように、宇宙から送られてくる多重センサのテレメトリと地上の幾何モデルのデータベースをもとに、CG上に描画して提示した。これは実世界の多重センサデータをもとに、実カメラでは得られない物理量を含む状態を多角的に実時間提示するため、仮想ハイパーカメラ表示と呼ぶ。仮想ハイパーカメラは、実カメラの2桁以下のテレメトリ情報で実時間表示可能であり、通信容量の小さい衛星間通信を経由した宇宙ロボットの地上における作業状況提示に適する。ディスプレイ上には3次元CGにより、

- 1) 全体鳥瞰図：作業対象およびアーム
- 2) ハンド：指の正面図と側面図
- 3) ハンド補助線：ハンドの先端線、ハンドの中心線
- 4) レンジビーム：距離センサのレーザービーム
- 5) 案内図形：対象物の接近用案内に用いる仮想円筒などの図形
- 6) 仮想作業面：操作の便宜上、仮想的に設ける局所平面
- 7) 作用ベクトル：手首力・モーメント、指圧覚の表示

等を作業に応じて表示した。Fig.7に表示例を示す。ソリッドモデルは、コマンドから生成されるアームとハンドの予測表示で、ワイヤフレームはテレメトリから

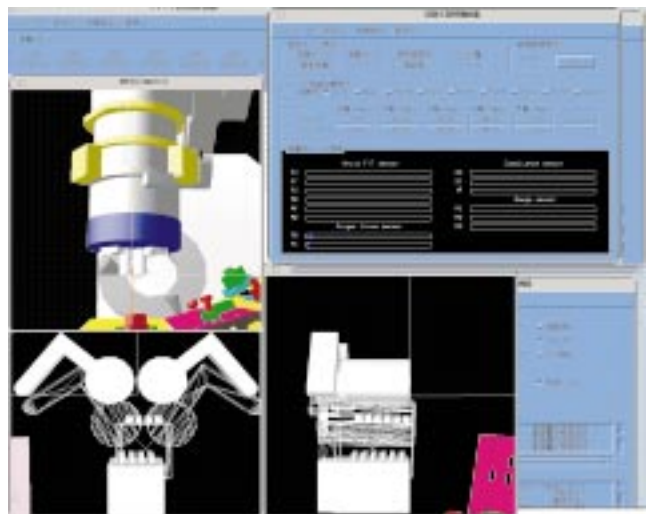


Fig.7 An example of computer graphic display (Solid model: predictive display, Wireframe: Virtual camera)

生成される仮想ハイパーカメラ表示である。実運用ではワイヤフレームが1巡通信遅延時間だけ遅れてソリッドモデルを追いかけることになる。表示周期はコマンド周期に合わせ 250ms とした。

2.4.3 遠隔教示機能

地上から作業環境計測や遠隔操作を支援するため、ロボットの遠隔教示を実時間で行う機能を設けた。教示は幾何モデルベースと実画像ベースの二つを可能とした。幾何モデルベースの遠隔教示は、3次元CADを扱う感覚で、CG表示されたロボットの幾何モデルの手先や指をマウスによりドラッグ・ドロップして、そこへハンドが到達するPTP軌道を生成させるものである。これは、Picking用ワイヤフレームモデルをマウスの動きに連動して表示する方法で行った。

ロボット作業により時々刻々変わる作業対象の位置、状態を幾何モデルのみで管理、表現するには人為的ミスが入る危険がある。そこで、実画像ベースの教示機能を設けた。これは、ハンドアイカメラの実画像上の目標点を指示して、そこへ到達するPTP軌道を生成するものである。実画像と幾何モデル画像は較正し、CGディスプレイ上にスーパーインポーズ表示する。

シミュレータ内に生成された軌道は3次元CGによりプレビューする。プレビューでは干渉判定を行い、干渉が検出された場合は警告表示する。動作の安全を確認後、生成された軌道を遠隔コマンド列として宇宙のロボットに送信する。この軌道計画、プレビュー、送信実行はシームレスに行えるようにし、地上から宇宙

のロボットにインタラクティブに「その場」教示できるようにした。

§ 3 宇宙実験システム

ETS-VIIは高度550km、傾斜角35度の円軌道を約96分で周回する衛星で、チエーサー衛星（ひこぼし）およびターゲット衛星（おりひめ）からなる。ランデブー・ドッキング実験時以外は両者は結合されている。ロボットシステムのフライトモデルの各コンポーネントをFig.8に示す。左から制御計算機、ロボット実験部、タスクパネル、電源装置である。ロボット実験部には打ち上げの振動・衝撃を緩和するため、アームが折り畳まれて固定され、ハンドも設置機構に分離して固定されている。タスクパネル以外はチエーサ衛星に搭載される。タスクパネルはハンド/大型アーム結合実験のための部品を収納しておりターゲット衛星に搭載される。各コンポーネントの設計は文献5に述べた。

地上系、衛星を含めた宇宙実験システムの全体図をFig.9に示す。網掛け部が本ロボットシステムのコンポーネントである。ロボットの運用はNASDAの筑波宇宙センターに設置した地上運用系から行う。コマンドデータはパケット化され、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に中継され、衛星間通信でETS-VIIに送られる。受信されたコマンドは衛星データ処理系から制御計算機に送られロボット制御

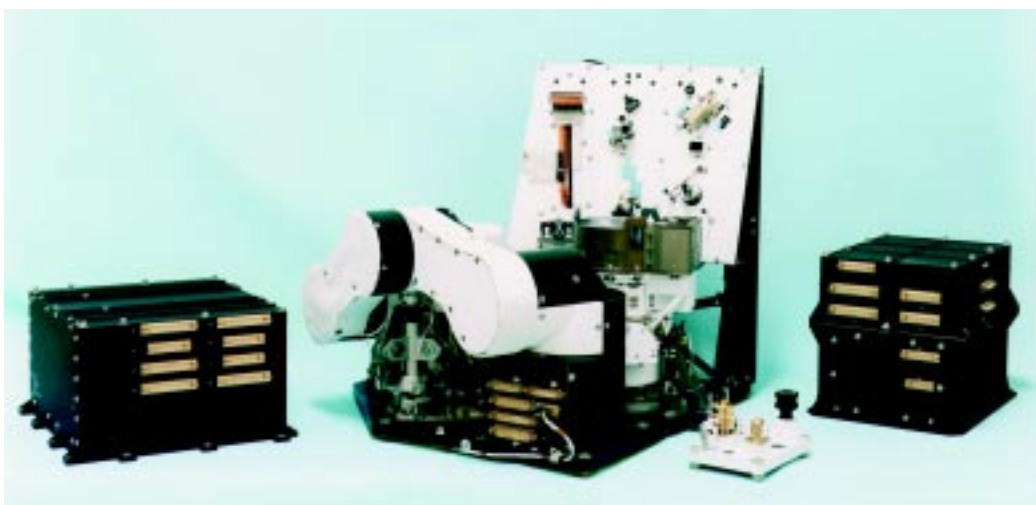


Fig.8 Flight model of the telerobotic system (Control computer, robot experiment unit including hand, arm and taskboard, small task panel, and power unit, from left to right)

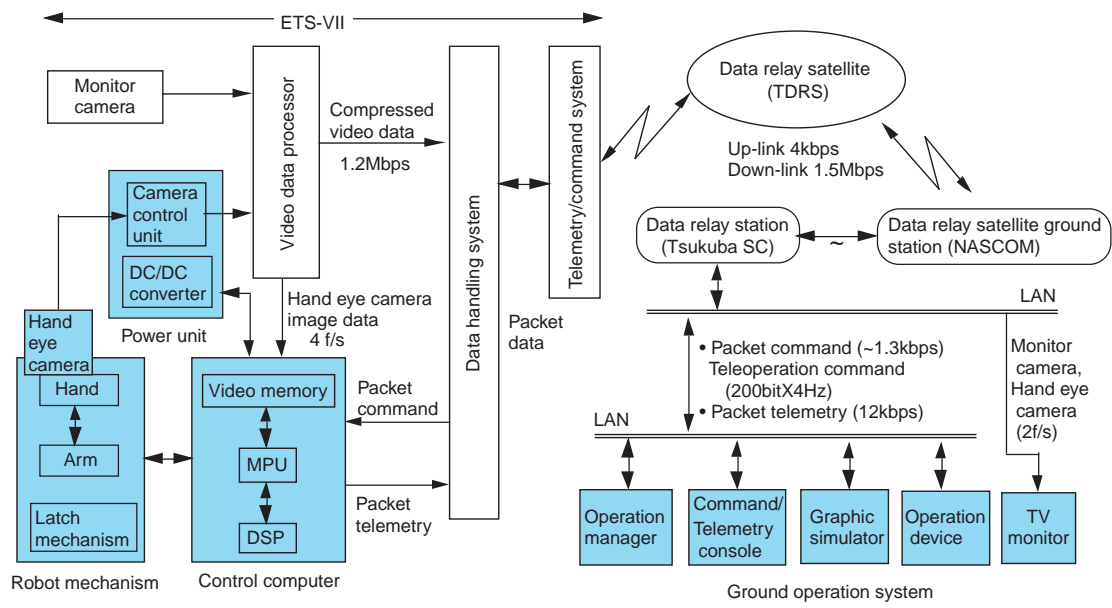


Fig.9 Control signal flow of whole space telerobotic system

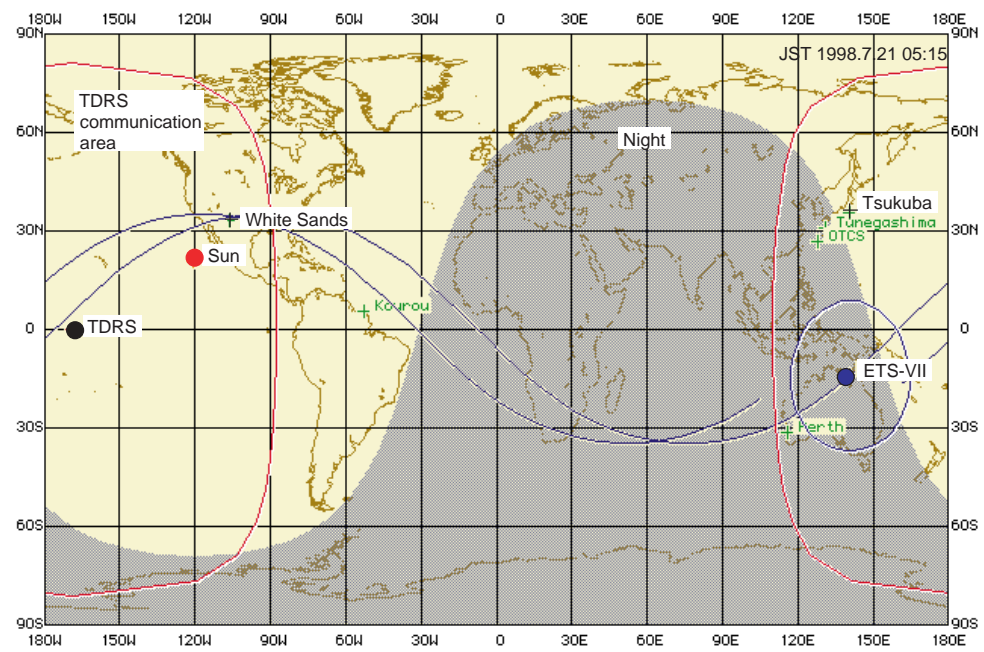


Fig.10 Operation window of ETS-VII

が行われる。テレメトリデータは逆の経路を通る。上り回線のレートは約4kbpsである。下り回線は1.5Mbpsで、そのうち約1.2Mbpsをビデオに、12kbpsを実験テレメトリに用いている。ビデオ信号は、モニタカメラによるロボット全体像とハンドアイカメラによる作業面のクローズアップ像の2chであり、いづれも通信容量の制限からモノクロ画像をJPEG圧縮し2フレーム/秒で送っている。ハンドアイカメラの画像は搭載系の制

御計算機で処理し自律制御にも用いる。一巡の通信遅延は5～6秒である。制御ソフトウェアは実験内容に応じて地上からアップロードする。ロボットの運用は地上運用系でのスーパーバイズのもとに自律的に作業を実行する多重センサベース自律制御、地上からの遠隔操作、および両者をマージした遠隔・自律融合操作の三つのモードで行った。

Fig.10 に実験運用ウインドウを示す。図には軌道の

2周回分，TDRSの通信可能範囲，日照・日陰部分を描いている。ロボット実験は原則として，衛星に電力が供給される日照に行う。また，ETS-VIIが西経170度の静止軌道にあるTDRSと通信できる位置関係にあるときのみ実験可能となる。したがって，概ね日本時間の未明から朝にかけて，連続する5～6周回を使って実験は行われる。図で，ETS-VIIの位置はTDRSと通信可能状態にあり，数分後には日照となり実験を開始できる待機状態にあることを示す。1周回当たりのロボットの運用時間は，TDRSとETS-VIIの通信時間42分の内，20分が割り当てられ，その間に作業単位を終える必要がある。

§ 4 宇宙実験の結果と評価

宇宙実験は衛星打ち上げから4ヶ月の軌道上待機を



Fig.11 View of robot in orbit ((a) Center: robot unit, Upper: Earth (b) Hand and taskboard through monitor camera)

経て，1998年3月から1年半にわたって行われた。Fig.11に軌道上のロボットを示す。上図の中央がロボット本体で，上部には地球が映っている。地球は作業時の照明源になっている。下図はモニタカメラによるハンド近傍の映像である。以下にセンサ融合テレロボット実験の結果と評価を述べる。

4.1 自律精密補償

多重センサハンドによる自律精密補償を，ボルトファスナの着脱作業を例に述べる。Fig.12にこの作業の状況を図示する。右にタスクボード上のボルトファスナを，左にハンドの模式図と記号を示す。打上固定機構を指で解除し，ボルトを抜き取り，下のポートにねじ込む作業である。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る，作業能力を評価する上からも適当なレファレンスタスクと考えられる。

ボルト外し作業の流れと対応する多重センサの適用をFig.13に示す。まず，ボルトヘッドをハンドアイカメラで探索し，その六角形の位相に対する指の接近計画を決定する。次に作業面の座標生成を行う。従来，座標生成は基準マークを画像センサで検出・処理して行うのが一般的であるが，面外成分の精度が悪いのが欠点となっていた。ここでは距離センサが面外成分を高精度に測定できることに着目し，距離センサと画像センサの情報を融合する方法を用いた。まず，手首周り

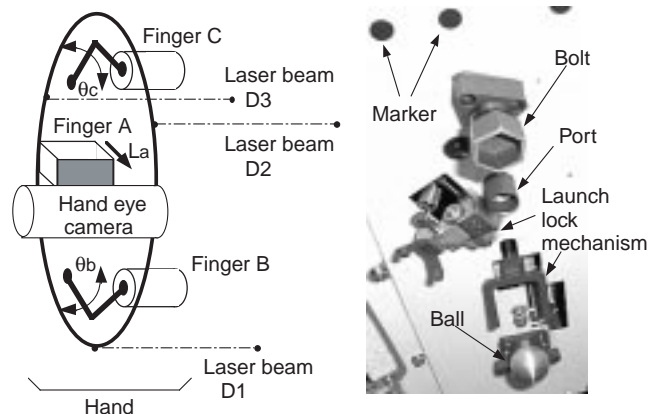


Fig.12 Schematic of hand and bolt fastener on taskboard

の3個の距離センサ値が等しくなるよう手首姿勢を制御して局所垂線(z軸)を得、次にパネル上の単位座標マークをハンドアイカメラで撮像し画像処理によりy軸を求め、マークを基準とした局所座標系(x-y-z)を生成する。作業面は白塗装し、マークは直径8mmの2個の黒塗りの円としている。照明源にはアルベド光(太陽光の地球からの反射)を利用しているが、照度は周回軌道での太陽照射角により大きく変動するため、実用精度が宇宙で得られるかがポイントであった。Table 1に生成したベース座標系に対する作業パネルの座標要素を地上室内での測定値と比較して示す。座標生成の精度は位置 $\pm 1\text{mm}$ 、方向0.3度以下が達成され、軌道上でもこの座標生成方式が高精度で行われることが実証された。一般に軌道上作業では、移動装置、大型アームなどで作業面に粗位置決めし、そこで局所座標系を生成して精作業を行うため、この結果は有用である。

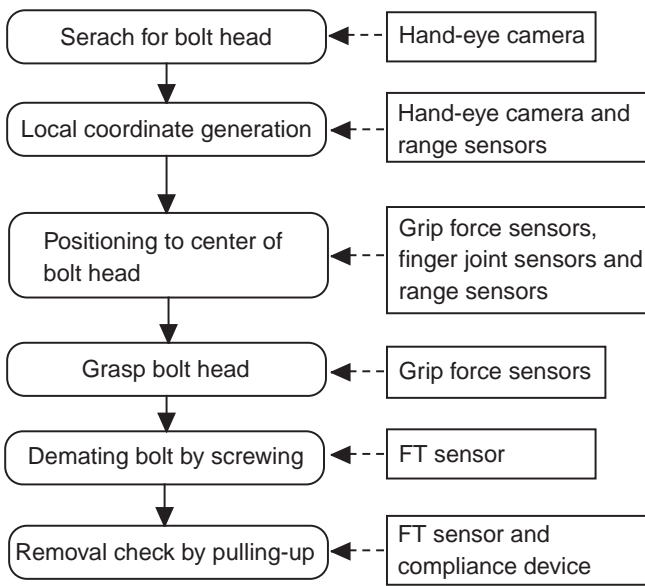


Fig.13 Operation flow and multisensory utilization for bolt fastener demating

Table 1 Results of local coordinate generation using range sensors and image sensor

Condition	Coordinate element			
	x (mm)	z (mm)	α (deg)	β (deg)
Albedo illumination (satellite noon)	389.78	434.42	17.10	104.73
Fluorescent lamp (Ground)	389.25	435.33	17.10	104.57

次に、この座標系を基準とし相対移動でボルトヘッドに接近する。ボルトヘッドの把持の際の局所位置決め誤差は、接触センサベースの自律制御で微小補正する。すなわち、ボルト垂直軸のアライメントは3つの近接センサの距離情報を用いて合わせ、中心は指の接触センシングで合わせる。Fig.14に中心合わせ時の三指A,B,Cの位置(La, b, c),B指の圧覚値(Fb),アームの水平位置補正量(dX, dY)を示す。まず、回転指BとCが閉じていき、圧覚センサで接触を判断してB,C指を止め、次に直動指Aを動かしてボルトを把持する。ここではB,Cの指の閉じ角(b, c)にアンバランスが検出されたため把持を解放し、その偏差に応じた量だけアームの水平方向位置を調整する。再把持を行うとアンバランスが解消され中心合わせが完了している。この方式による把持の中心調整誤差は1mmであり、残留誤差は手首コンプライアンス機構で吸収する。

上記の精密補償後、手首ロール軸を回転してボルトの脱作業を行った結果をFig.15の上のグラフに示す。ここではz方向の力(Fz)とトルク(Mz)をモニタしながら60度ステップでボルトヘッドを反時計方向に回し、180度回した時点で微小引き上げ動作を行い、抜けたかどうかを反力Fzで判断している。微小引き上げはコンプライアンス機構のz方向伸び代を利用し、ボルトの固体潤滑膜の損傷を避けている。回転時の摩擦トルクMzは十分小さく、中心軸の精密補償が有効に働き、こじることなくボルトの脱動作が行われていることがわかる。ここでは反力が検出されたので、次の回転動

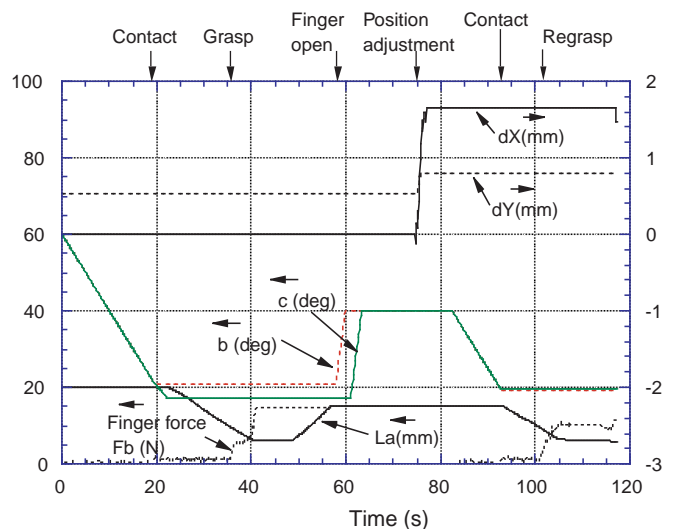


Fig.14 Fine position adjustment by finger contact sensing

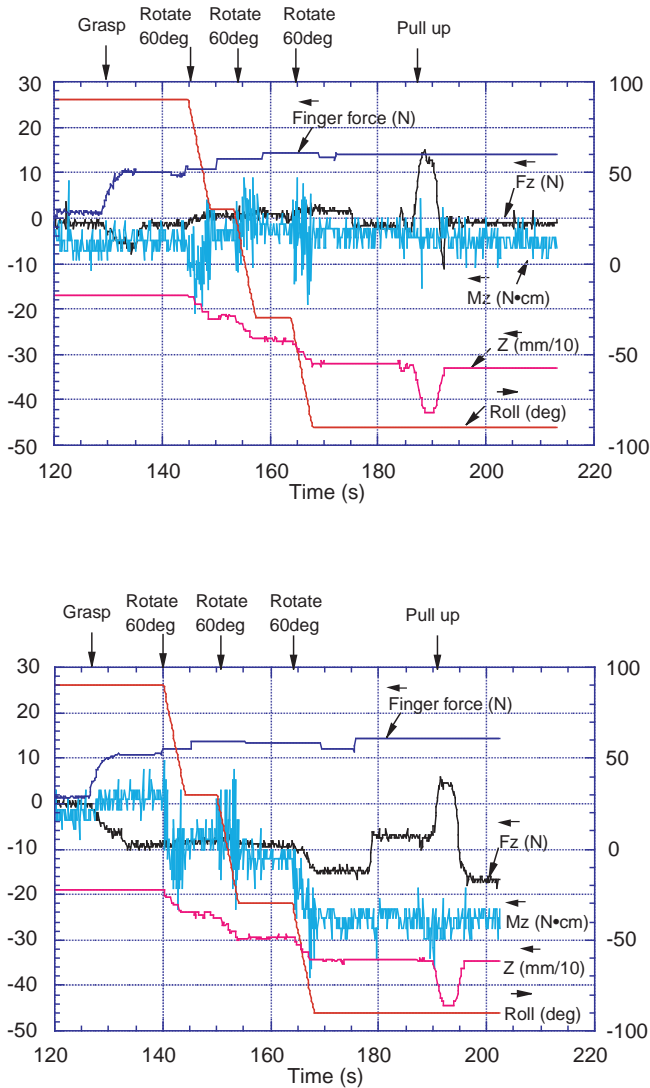


Fig.15 Multisensory control in bolt unscrewing
(Top: Space, Bottom: Ground)

作に移る。このような動作を繰り返してボルトの脱着作業を自律制御で完了できた。下の図は同じ作業の地上試験の結果である。地上ではボルトを把持したとき自重成分が相殺されるなど、 F_z 、 M_z が大きく変動している。宇宙ではほぼ零レベルを保っており、把持の際の中心出しが高精度に行われていること、および、無重力であることの証左になっている。力・トルクセンサに関しては、宇宙では重力外乱がなくなり、応答が明瞭に現れ、接触センサベースの制御に都合が良い場であることが実感された。他は、宇宙と地上でほぼ同様のプロファイルで作業が進行していることがわかる。

4.2 地上からの遠隔・自律融合操作

多重センサを用いた遠隔・自律融合操作の例として、

自由度を自律制御で一部拘束しつつボルトの着脱を行った結果を述べる。操作の様子を Fig.16 に示す。ハンドアイカメラによる作業面像(a)はカメラ軸がハンド中心に無いためボルトが見えず、また、モニタカメラによるハンド近傍像(b)はボルトやポートを識別できる視認性を持たないため、着脱作業時には用をなさない状況である。そこで、操作者はこれらを補助的に参照しつつ、前述のデスクトップ型操作インタフェースの仮想ハイパーカメラ表示を見ながら操作装置を用い遠隔操作した(c)。

ここでボルトの把持は自律、把持したボルトのポートへの位置決めと着座は遠隔操作で行い、ボルトのポートへのねじ込み、および取り外しは遠隔・自律融合操作で運用した。融合操作では、ネジの軸方向を力制御、水平方向をコンプライアンス制御モードで自律制御しつつ、手首ロール軸回転のみ遠隔操作した。

まず、自律制御で把持したボルトの先端を、CGモデルのポートに設けた案内円筒の中心線とハンドの中心補助線が一致するように遠隔操作してポートの水平位置合わせを行った。案内円筒はポートのネジ外径を直径としている。位置合わせ後、CG上の案内円筒に沿い、



(a) Hand-eye camera

(b) Monitor camera



(c) Desktop telerobotic operation interface

Fig.16 Operation scene of bolt mating task by sensor-fused telerobotics

ボルトを遠隔操作でポート入り口に接近・接触させ、さらに押しつけ着座させた。これらの並進動作はマウス型マスタにより遠隔操作した。次に、押しつけ力(約8N)を印加したまま、手首ロール軸のみジョグダイヤルを回し、遠隔指令を与えた。

ボルトを外す操作では、軸方向の引っ張り力を与え、手首ロール軸のみジョグダイヤルを反時計方向に回して遠隔指令を与えた。他の自由度はコンプライアンス制御で拘束した。Fig.17にそのときのデータを示す。約20度の手首回転で、引っ張り力が解放され、外れたことがわかる。ポートのねじのかみ合わせの開始位置(回転位相)はこの回転角から知ることができ、後の作業のデータベースとすることができた。これは能動的な作業環境計測の一例と言える。

この着脱作業は遠隔操作のみでは30分以上かかり、軌道2周回分必要なのに対し、遠隔・自律融合操作では約20分で完了しており、自律制御の約15分に近い作業効率を達成できた。自律制御に対する時間増は、遠隔操作でのボルトの位置決め、着座が主要因であった。ねじ込み、および取り外しは、融合操作の導入で操作者の負担が軽減され、時間増は少なかった。この融合操作はサイズ、かみ合わせの位相、ピッチ、ねじ込み深さが不確定なボルトファスナの着脱など、作用力の管理を含め人間の判断を随時介入させながら作業する場合に適している。

この運用において、多数のセンサ情報をモニタしながら精密作業するにもかかわらず、デスクトップ型操

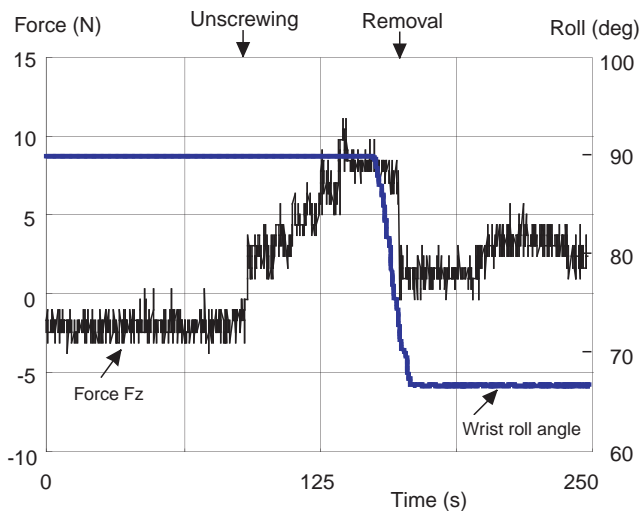


Fig. 17 Data of force and wrist angle in bolt removing

作インタフェースの導入により、遠隔操作する要員は1名で対応できた。操作者からは、ポート近傍の画像が得られない状況での遠隔操作に仮想ハイパーカメラ表示が非常に有効なこと、5秒程度の通信遅延でもスムーズに操作できたこと、マウス型マスタは位置指令にジョグダイヤルは回転指令に有効で、ともに操作性は良好であったことなどが報告されている。

4.3 遠隔教示と作業環境計測

作業環境計測の例として、球状部品の位置計測と保持状態調査について述べる。この部品は、球の端に取り付けた細いワイヤの張力で、本来、球面座にルースに保持されているものであるが(Fig.12参照)、把持の際に保持剛性の異常が指圧覚により検出された。そこで、接触センシングにより位置確認と保持状態を調べた。

操作はデスクトップ型操作インタフェースの遠隔教示機能を用いて行った。まず、距離センサと画像センサを用いた局所座標生成によりCGモデルのキャリブレーションを行った。また、球状部品のアクセスは取り付け角の制限から作業面に対し斜めに行う必要があるため、これに応じた仮想作業面を設けた。この仮想作業面に対してハンドを垂直に接近させる軌道を、CG上のハンド手先をマウスでドラッグして教示し、次いで、CG上でプレビューして干渉の有無を確認し、生成軌道を宇宙に送信した。同様に、手先の精密位置決めをCG上の指のドラッグ操作で教示し、プレビュー、送信・実行した。次に、指で球を軽く把持し、圧覚値と各指の位置情報を取得した。同様に、手先位置のx, y, z方向の微小移動と把持を繰り返し、接触センシングを行った。Fig.18に遠隔教示の様子を示す。左下が教示画面でCGモデル画像とハンドアイカメラの実画像が重畳表示されている。これらの調査結果を解析し、球状部品は所定の位置に保持されていること、および、球面座に凝着状態にあることが判明した。凝着の原因は打上時の振動か、軌道上での熱真空環境によるウェルディングと推定している。これは、「その場」遠隔教示と多重センサによる能動的センシングが、宇宙の作業対象の異常調査を含む作業環境計測に柔軟に対応できたことを示す一例である。

本運用において遠隔教示性は良好であった。マウスのドラッグによる教示、プレビューによる軌道の安全

確認，その場でのシームレスな軌道計画から実行という本方式の特徴が，臨機応変の対応が必要な異常状況調査に効果的であった。

また，2.3節に述べた基本戦略に基づき，ドッキングした衛星（おりひめ）上の試料周りの作業環境計測を行った。まず，試料上空で手首ロール軸を順・逆方向に定速回転してレーザー距離センサを走査した。手先からの距離プロファイルを図.19に示す。三角測量方式に起因するエッジ付近の不定データは排除している。図面から推定されるエンベロップ（破線）に近い形が得られている。距離センサは高さ方向以外は精度が悪



Fig.18 Operation scene in remote teaching (Top left: Taskboard view through hand-eye camera, Top right: Hand and taskboard view through monitor camera, Bottom left: Superimposed display of 3-D CG and real video image, Bottom right: Operator console)

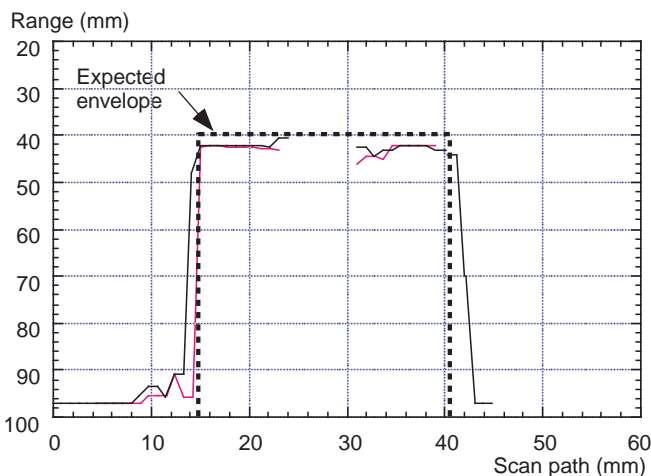


Fig.19 Depth profile of sample cartridge measured by proximity range sensor (after processing)

いため，平面形状は手先カメラの画像，試料位置は指による接触センシングを行い，これらを融合し，試料の位置，外形情報を1.5mm以下の精度で知ることができた。

4.4 「おりひめ」からの試料回収・収納

本節ではセンサ融合により大型アームに精密作業性を与える実験を行った結果を述べる。前述の多重センサハンドを小型アームから分離し，NASDAの長さ2.4mの大型アームに軌道上で結合し，「おりひめ」上の小さな試料の回収・収納を行った。これはターゲット衛星「おりひめ」を材料実験衛星に見立て，タスクパネルの試料固定セルから試料を取り出し，チェーサ衛星「ひこぼし」の回収ポートに収納し，さらにもとに戻すタスクである。試料と固定セルの構造を図.20に模式的に示す。セルの穴には三本のピンが半径方向に配向されており，試料の円柱側面には鉤状の案内溝が切られている。試料は打上時の振動・衝撃で脱落しないよう，スプリング圧で固定されている。試料を取り出すには，セル内のピンが試料側面の案内溝に沿うように，スプリングに抗して軸方向に試料を押しながら反時計方向に60度回転させ，その後，引き抜く手順となる。収納の際は，案内溝とピンの位相が合うように挿入し，スプリングを押しつけ，時計方向に60度回転させ，ピンがラッチ溝に到達した段階で引き上げるとロックされる。「ひこぼし」の回収ポートは円筒で，底面はベルクロメッシュになっており，試料の底面のベルクロフックを押しつけて係留する方式である。押しつけ時の衝突力を緩和するため，回収ポートの底面はスプリングで支持されている。

この作業を実行するには，試料の把持中心および深

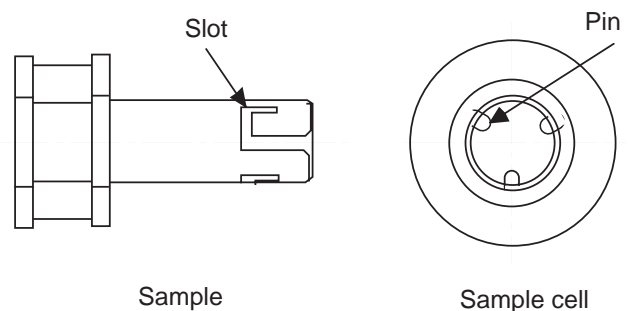


Fig.20 Lock mechanism of sample

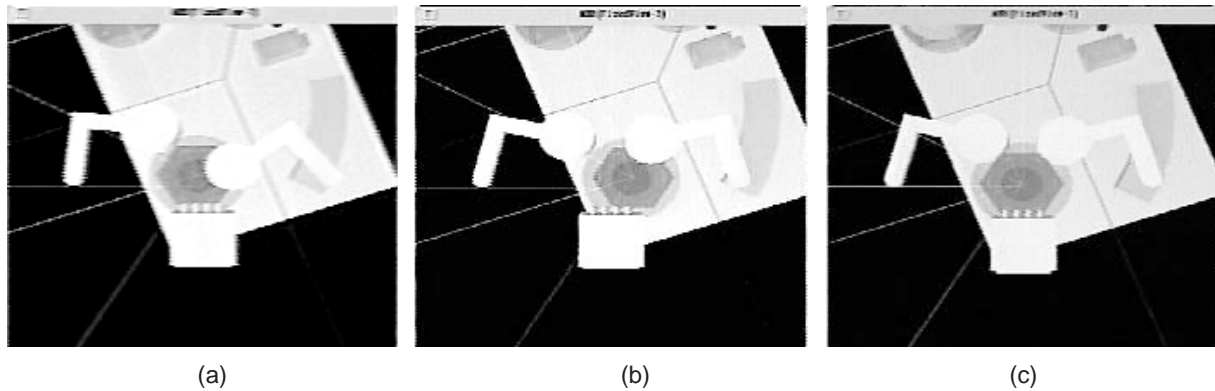


Fig.21 Remote measurement of object position by grasp-sensing from the ground
(a: Initial grasping, b: 2nd grasp-sensing, c: Grasping after CG calibration)

さを精度良く調整する必要がある。大型アームの絶対位置決め精度は $\pm 10\text{mm}$ であるが、これを $\pm 1\text{mm}$ 以内に補償する必要がある。また、着脱時には、押しと回転動作を同時に加え、さらに、ピンが鉤状の案内溝に沿って滑りながら規定量移動していることを逐次判断する必要がある。アーム長が2mを越えること、試料セルおよび回収ポートがモニタカメラおよび手先カメラの視野外になるため、きわめて難度の高い作業といえる。これらに対応するため、アームの力覚制御はもちろん、ハンドの指機構、コンプライアンス機構、および多重センサの機能を駆使した。

まず、試料の位置が不確定なので指の接触センシングで同定する。ここでは、六角柱の部品に対し、三本指を閉じていき、圧覚を検出した時の指の開度から中心位置を推定する。地上では、アームの位置および指開度のテレメトリデータから、CGで仮想カメラ表示する。Fig.21に接触センシング時のCG表示を示す。最初、三本指で軽く把持したとき、指の開度に大きなアンバランスが見られ(a)、CADデータに基づき表示した部品の位置と実位置に大きな差があることが判明した。この指の幾何学的な位置関係から試料中心位置を計算し、ハンドを誤差分だけ相対移動させ再把持を行った(b)。指の開度から、ハンドのほぼ中心で把持していることがわかる。この時の指の開度から再度、誤差を計算し、CADデータを修正して、最終的に9mmの位置補正を行い、(c)に示すように、実世界と地上の幾何モデルとの整合をとることができた。この方式による合わせ込みの精度は、 $\pm 1\text{mm}$ 程度と推定される。

次に上述のキャリブレーションされた位置データをもとに試料を再度把持し、指の接触センシングにより



Fig.22 Operation scene in sample return from "Orihime" to "Hikoboshi"

中心位置の微調整を行った。また、距離センサデータを基に指の把持深さを調整した。これらの補正後、試料を把持し、押し込みながら、60度反時計方向に回し、その後、力追従(目標値5N)で引き上げ、試料の取り出しを完了した。

固定セルから取り出した試料を「ひこぼし」の回収ポートに運搬し、ベルクロに押し付けて付着させた。付着操作では、軸方向を力追従(目標値2N)、面内方向をコンプライアンス制御している。Fig.22に「ひこぼし」に試料回収中のロボットおよび地上運用の様子を示す。付着後、コンプライアンス制御のもとで試料の引き剥がしを行った。この時、約2Nの付着力が検出された。

次に試料を「おりひめ」の試料固定セルに運搬し、再収納した。Fig.23の上図に収納操作時のハンド先端位置と作用力を、下図にハンドの指圧覚値と距離センサ

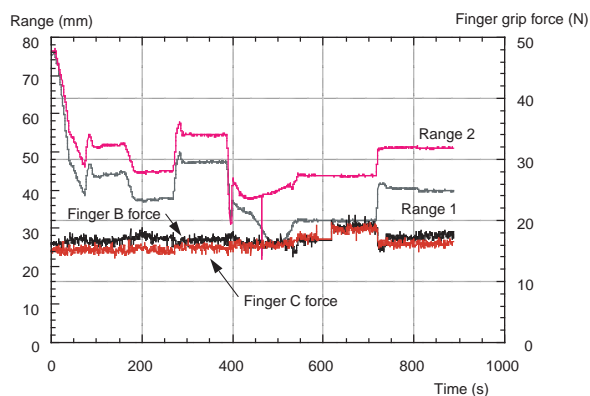
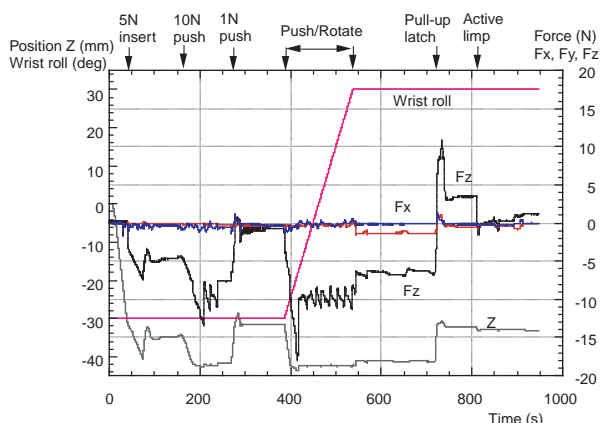


Fig.23 Telemetry data in sample restore (Upper : Force and position of arm, Lower : Range and grip force of hand)

のデータを示す。まず、位置決め後、軸方向に5N, 10Nの二段階の力追従制御で試料を仮挿入し、次に、目標値を1Nにして力を緩和し、バネ力で試料が戻る状態を調べた。これは試料の案内溝とセル内のピンの位相が合い、引っかかり無く挿入できるかを確認するためと、試料押し込み開始位置を確認するための操作である。次いで、押し込み力10Nで軸方向を力制御しながら手首を時計方向に60度回転させ、その後、5Nで引き上げ、ラッチ溝に入れた。挿入深さが所定の位置になっていることを距離センサで確認し、その後、能動リンパ制御で引っ張り力を解放した。次いで、指を開いてハンドを引き上げ、試料収納を完了した。各テレメトリデータは作業が円滑に進行したことを示している。

この運用では、地上で、テレメトリデータから再構成したCGによる仮想カメラ画像と多重センサのグラフ表示を見ながら作業状況を総合的に判断し、サブタスク毎のプログラム制御のGo/NoGoを指令した。作業

中はモニタカメラが視野外で実画像を見ることができないため、これらの表示は作業遂行に不可欠であった。

§ 5 結び

宇宙実験では、上記のほかにコネクタ着脱、ワイヤ操作、太陽電池シートと熱ブランケットの展開・収納などのデリケートなタスクを行い、軌道上精密作業への適用性を確認した。ムービーを含む実験の様子はWEB¹⁴⁾で見ることができる。本論文での主な結論は以下のとおりである。

- 1) 宇宙軌道上での精密作業に適したセンサ融合テレロボティクスの概念を示した。
- 2) 上記の概念を実現するためのキー要素として、新しい三指機構と多重センサを特徴とするハンドを開発し、それを利用して精密位置・力補償および作業環境計測を行う基本戦略を示した。
- 3) 軌道上精密作業に適した、マウス型マスタと仮想ハイパーカメラ表示、および、「その場」遠隔指示機能を特徴とするデスクトップ型操作インタフェースを構築した。
- 4) 上記を総合したシステムによりセンサ融合テレロボティクスの宇宙実験を行い、多重センサを融合した精密補償、遠隔操作、遠隔作業環境計測、遠隔指示が軌道上の精密作業に有効であることを実作業により示した。また、大型アームにハンドを装着し、多重センサに基づく誤差補償と状況判断により精密作業が可能になることを、ターゲット衛星の試料回収実験で示した。

宇宙飛行士の手作業相当の精密作業を無人宇宙機のロボットで実施した例は世界で初めてであり、本実験が宇宙開発におけるロボットの役割の拡大に貢献することを期待している。

謝辞

この宇宙実験は通産省の施策として、宇宙空間の産業利用を効率的に進めるロボット要素技術の修得と、宇宙産業界における同技術の涵養を目的として推進された。御尽力頂いた、通産省、USEF、富士通およびNASDAの関係者に感謝する。

参考文献

- 1) H.Borduas, D.Gossain, A.Kong, E.Quittner and D.Shaffer: Concept Design of the Special Purpose Dexterous Manipulator for the Space Station Mobile Servicing System, Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol.35, No.4, pp.197-204, (1989)
- 2) T.Matsueda, F.Kuwano, S.Motohashi and R.Okamura : Development of Japanese Experiment Module Remote Manipulator System, i-SAIRAS 94, pp.183-186, (1994)
- 3) G.Hirzinger, B.Brunner, J.Dietrich, and J.Heindel: Sensor-Based Robotics - ROTEX and Its Telerobotic Features, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5, pp.649-663, (1993)
- 4) K.Machida et.al., : Preliminary Design of Advanced Robotic Hand for Space Experiment on ETS-VII, ICAR'93, Tokyo, (1993)
- 5) 町田, 三上, 秋田: 衛星搭載用精密テレロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp.577-586, (1999)
- 6) M.V.Noyes and T.B.Sheridan : A Novel Predictor for Telemanipulation through a Time Delay, Proc. Annu. Conf. Manual Control, NASA Ames RC, (1984)
- 7) 神徳ほか : 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.6, pp.750-759, (1992)
- 8) L.Conway, R.Volz, and M.Walker, Teleautonomous Systems: Methods and Architectures for Intermingling Autonomous and Telerobotic Technology, IEEE Robotics Automat., Vol.6, No.2, pp.146-158, (1990)
- 9) G.Hirzinger, B.Brunner, J.Dietrich, and J.Heindel: Sensor-Based Robotics - ROTEX and Its Telerobotic Features, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5, pp.649-663, (1993)
- 10) 脇田, 平井, 町田, 荻本, 井床, 桂川, 安本: 知的モニタリングシステムとその宇宙用遠隔操作ロボットへの適用, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp.540-548, (1999)
- 11) T.B.Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, MIT Press, pp.13-96, (1992)
- 12) 村瀬, 石井, 駒田, 町田, 秋田: 宇宙ロボット用三指多重センサハンドの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.124-133, (1998)
- 13) 津田, 村瀬, 町田, 秋田: 宇宙ロボットの地上操作装置の開発, 第13回日本ロボット学会学術講演会 (1995)
- 14) 町田 : 高性能ロボットハンドの宇宙実験, <http://www.etl.go.jp/5822/ARH/>, (1998/1999)

(2000.2.16受付)