衛星搭載用精密作業テレロボットの開発

町田 和雄^{*1} 三上 龍男^{*2} 秋田 健三^{*3}

Development of Precise Telerobotic System for Unmanned Spacecraft

Kazuo Machida^{*1}, Tatsuo Mikami^{*2} and Kenzo Akita^{*3}

Space robots performing precise servicing tasks in unmanned facilities will be indispensable in space activity of the 21st century. This paper presents the development of a precise telerobotic system which is the world's first precise extra-vehicular robot aboard the satellite, ETS-VII. The robot has the features of skill and autonomy for handling various parts in space through a three-finger multisensory hand. Firstly, we discuss the requirements for in-orbit precise servicing by a robot and system constraints to integrate into the satellite, and present the total system design for space telerobotic experiment. Secondly, we describe the design of robot mechatronics adapt to space use. The launch lock mechanisms and reconfiguring method of the robot in orbit are also described. Thirdly, an architecture and design of the onboard control computer system to manage various tasks flexibly and safely are presented. Finally, the multisensory based control for precise task execution and development result of the flight model are presented. The system was launched, and initial checkout reveals the system works well in-orbit.

Key Words: Space Robot, Precise Telerobotics, Multisensory Hand, Extravehicular Robot, Space Experiment

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。将来の宇宙におけるロボットの役割を拓けるには, 部品レベルの精密作業能力を有する船外ロボットが重要となる。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で動作するもので, 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, 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る。

筆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ている。このロボットは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, 宇宙暴露環境で作業可能なこと, 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がことが新規な特徴であり, 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に先駆けたものである。

本論文ではこのロボットシステムの設計と衛星搭載モデルの開発について述べる。まず, 船外精密作業ロボットの要件とシステム制約条件を述べ, これらを満たし衛星に搭載可能なシステム設計について述べる。次に, 宇宙適応化のためのロボットメカトロニクスの設計について述べる。次いで, 多重センサを用いた精密作業制御法と衛星搭載モデルの開発結果を述べる。

2. 船外精密作業ロボットのシステム設計

2.1 ミッション

船外精密テレロボット技術をETS-VIIの制約範囲で可能な限り実証する実験システムを考える。概念検討の流れをFig.1に示す。軌道上精密サービス作業の要件を抽出し, 衛星システム制約条件と宇宙環境条件のもとで実現可能な実験システムのベースラインを定めることにする。まず, 軌道上精密サービス作業に対するロボットへの一般的要件であるが, 図の左に示すように

i) 宇宙ではサービス対象のスケールが一般に大きいため広い作

原稿受付 1998年5月12日

^{*1}電子技術総合研究所

^{*2}富士通株式会社

^{*3}無人宇宙実験システム研究開発機構

^{*1}Electrotechnical Laboratory, MITI

^{*2}Fujitsu LTD

^{*3}Institute for Unmanned Space Experiment Free-Flyer

Fig.1 Design strategy and solution for space test of precise telerobotic system

業範囲が要求されるとともに、ローカルには多種多様な部品を位置や力の精密な制御のもとにハンドリングすることが要求される。

ii) サービス作業は多数の小作業の積み重ねからなり、作業環境や対象の不確実性が累積していくため、これらの計測を作業の進行に応じインタラクティブに行える必要がある。

iii) 地上からの精密かつ柔軟な運用性が要求される。この場合、作業場所が遠い宇宙にあるため作業情報の取得および地上への伝達は制限され、かつ、時間遅れに対処しなければならない。

宇宙実験はこれらの要件に対応する技術の習得、検証を行うことを主目的とした。

2.2 制約条件

ETS-VIIは高度550[km]、傾斜角35度の円軌道を約95分で周回する親子衛星で、重量約2,500[kg]のチエーサ衛星とランデブードッキングの対象となる380[kg]のターゲット衛星からなる[6]。ロボットはチエーサ衛星の地球指向面に搭載される。本搭載機器に対する衛星システムからの制約条件には次のものがある。重量、電力に関しては45[kg]、80[W]以下、ロボット機構系の収納空間は50[cm]立方以内である。ロボットの作業は静止軌道のデータ中継衛星とETS-VIIが通信可能でかつ日照の時間帯に行い、1周回で20分を1単位として割り当てられている。ロボットの作業単位はこの時間で閉じるように計画するとともに、通信切れに備え臨機応変な処置ができるシステムとする必要がある。地上系と軌道上系との通信時間遅れは、米国のデータ中継衛星(TDRS)を用いた通信ネットワークを使う場合、経路によるが4～10秒と見積もられている。安全性に関しては、いかなる場合も物体を空間に放出しないこと、および、暴走しないための多重の対策と万一暴走しても衛星の他機器を破損しないことなどが要求される。

環境条件としては打ち上げ時の振動・衝撃や軌道上での真空、熱、放射線などがありこれらに耐えるハードウェアが必要である。これらの主な設計要求条件をTable 1に示す。また、軌道周回中に作業面の照度は時々刻々と変動するので視覚系はこれに対

Table 1 Space environmental design requirements

Environment	Specifications
Vibration (Z-axis)	Sine wave (2oct/min) 5-15Hz: 10G 15-100Hz: 25G Random wave (4.4min) 19.7Grms (20-2000Hz)
Shock	Shock response spectrum 100-600Hz: +8db/oct 600-4000Hz: 1000G
Vacuum	10^{-6} Pa
Thermal environment	Solar radiation: 1289-1421W/m ² Earth emission: 189-261W/m ² Albedo coefficient: 0.2-0.4 Satellite earth-panel: -40-+60deg C
Penetrating radiation	21.5 Gy (Aluminum shield: 1mm)

応する必要がある。さらに、地上試験で調整された計測・制御のパラメータは宇宙で較正する機能が必要である。

2.3 システム設計

2.3.1 テレロボットシステム

2.1節に述べた船外精密サービス作業の要件に対応しテレロボットシステムを次のように設計した。

i) 位置と力を精密に調整できる能動3自由度の指と、受動4自由度の柔軟な手首を有するセミデクステラスなハンドを搭載する。

ii) ハンド回りに非接触と接触の5種類のセンサを実装し、多重センサによる遠隔センシングが行えるようにする。

iii) 搭載側に部分自律の機能を持たせ局所精細作業の実行のレベルを分担させ、地上系で大局的な環境認識と作業指令発信のレベルを受け持つ分散型テレロボット構成とする。

宇宙機器の重量, スペース, 消費電力の制限は厳しく, また, 真空, 熱, 放射線の過酷な環境の中で高い信頼度で働かなければならないためその開発コストは大きなものとなる. したがってロボット制御系の軌道上構成はローカルな自律性を満たす機能にとどめ, 制御周期が遅くてもよい上位レベルの知的制御や動作監視は計算機グラフィックスベースのテレロボティクス手法により地上運用系で行うことを設計の基本とした. 以上のことから構築した宇宙実験システムの全体概念を Fig.2 に示す.

衛星を含めたテレロボットシステムの制御情報全体の流れを Fig.3 に示す. 網掛け部が本システムのコンポーネントである. ETS-VII の搭載ロボット系, データ処理通信系, NASA のデータ中継衛星 (TDRS), 通信ネットワーク系 (NASCOM), および筑波宇宙センタの地上衛星運用系, 地上ロボット運用系を結ぶ空間的に巨大なループのテレロボットシステムを構成している. 地上系と搭載ロボット系の間はパケット化されたデータにより, アップ

Fig.2 Construction of space telerobotic system

リンク 4 [kbps], ダウンリンク 1.5 [Mbps] のレートで通信される. ダウンリンクには 1.2 [Mbps] の TV 画像データのほか 12 [kbps] の実験テレメトリデータが含まれる. 制御ソフトウェアは新たな技術実験が随時できるように実験内容に応じて地上からアップロードする方式とした. ロボットの運用は地上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を主とし, 他に地上からの遠隔操作, および両者をマージした自律・遠隔融合操作の三つのモードを可能とした. 遠隔操作では動作指令を 4 [Hz] で送信する. TV 画像に関して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を地上に送信する. いず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/秒のレートで送る. ハンドアイカメラの生画像は搭載系で処理し自律制御に用いる. 設計したシステムの主要諸元を Table 2 にまとめる.

2.3.2 ロボット実験部

ロボット実験部は長さ 0.7 [m] 級の小型アーム, ハンド, タスクボードから構成した. タスクボードにはロボット作業のための様々な部品を取り付ける. 打ち上げコンフィギュレーションは寸法制限と振動・衝撃条件を満たすためアームとハンドは分離して固定する方式とした. 軌道上では作業形態に自ら再構成する機能を持たせる. 宇宙実験はこのロボットシステムのみで行う単独実験と, 宇宙開発事業団が開発する長さ約 2.4 [m] の大型アームにこのハンドを結合し, ターゲット衛星のサービス作業を行うハンド/大型アーム結合実験の 2 形態で行えるようにする. 後者では大型アームをマクロ位置決め装置として用い, 広い領域での精密作業実験を行う. 実験タスクは将来の宇宙機器の保守に必要な主な作業要素を切り出して次のように設定した. 単独実験では電気コネクタの着脱, ボルトファスナの着脱, 浮遊部品の捕獲, ソーラーセルシート展開による発電, 熱ブランケット張付, ワイヤ配線などの精密作業を行う [5]. また, 日陰時にも LED の照明を用いた電気コネクタの着脱実験を試みる. これらの実験は

Fig.3 Control signal flow of whole space telerobotic system

Table 2 Specifications of space telerobotic system

Total system mass	45kg
Dimensions (stowed)	500x480x480mm
Average power	80W
Hand	
DOF	3
Grip force	30N
Compliance	0.15mm/N (x,y) 0.075mm/N (z) 3deg/Nm (roll)
Mini-arm	
DOF	5
Length	716mm (from base to hand)
Accuracy (relative)	$\pm 0.5\text{mm}$, $\pm 0.3\text{deg}$
Tip force, torque	40N, 7Nm
Torque driver	1.4Nm/2.25rpm
Telemetry/Command	
Teleoperation command	200bits x 4Hz
Packet telemetry	12kbps
Video data (down link)	
Channel	2ch, JPEG compressed monochrome
Frame rate	2 frame/s
Mission period	1.5 years

Fig.4に示すタスクボードの部品を使って行う。部品は打ち上げ時、ロンチロック機構で固定し、軌道上でロボットハンドにより解放する。ハンドを大型アームに取り付けた結合実験では、ターゲット衛星のコネクタ着脱とサンプルの回収を試みる。

3. ロボットメカトロニクス設計

ここでは上記システムを実現するためのロボットメカトロニクスの設計について宇宙適応化の観点から述べる。

3.1 ロボットアーム

アームは多関節型とし、各関節のアクチュエータにはDCブラシレスモータとハーモニックドライブの組み合わせを用いた。サーボセンサにはレゾルバを用い、原点センサとリミットセンサには高周波発振型の近接センサを用いた。各関節のトルクは前述のタスクを行うため、無重力で先端力40 [N], 7 [Nm]が得られることを条件に配分した。関節アクチュエータの潤滑には、宇宙の真空はもちろん地上大気で動作試験できるようPFPE (Perfluoro-Polyether) を基油、PTFEを増ちょう剤とし MoS_2 を添加したグリースを用いた。関節の温度制御は、待機時はサーマルペイントと多層インシュレータにより軌道上保管温度を維持し、実験時に各関節に配したヒータにより能動熱制御を行う方式とした。熱解析により待機期間の関節の最低温度は低温ケース (太陽角0度) で -17°C 、実験時の最高温度は高温ケース (太陽角 58.5°) で $+46^\circ\text{C}$ と見積もられ、許容温度範囲に収められる見通しを得ている。なお、多層インシュレータの最外層は白色のベータークロスを用い太陽光の反射を抑え視覚系の障害にならないようにした。

アームの先端にはハンド結合用ツールを取り付けた。ツールはFig.5に示すようにステッピングモータを平歯車で減速してカムを駆動し、カムフォロワを介しクランプ爪を外側に倒し、ハンド側のフィクスチャの溝に爪を挿入して結合する構造とした。ハンドの固定後、トルクドライバによりハンド側フィクスチャのボルトを回転させコネクタをスライドして結合させ、アーム/ハンド間の電氣的結合を行う。トルクドライバのアクチュエータにはス

Fig.4 Taskboard and work cells **Fig.5** Wrist tool mechanism for hand connection

テッピングモータと遊星ギアの組み合わせを用いた。また、ソケットにはスライド式のエスケープ機構を配しハンド結合時のボルトヘッドとの位相差による干渉を回避した。このツールは後述するように打ち上げ時のアーム先端固定にも用いる。

3.2 ハンド

ハンド設計の基本指針は、多指により多様な部品を精度よくハンドリングできること、多重センサにより自律性を向上させることにある。前者については、宇宙用としてシンプルで信頼性の高い3指機構、搭載計算機の負荷の少ない精密位置補償方式、多様な形状の部品に対し宇宙空間で「落とす」ことのない指の把持安定性を得ることがポイントとなった。そこで、Fig.6に示したように、指機構を親指に相当する直動指A、および、人差し指、中指に相当する2本の回転指B、Cで構成した。回転指には圧覚センサを取り付け、接触検出や把持力制御ができるようにした。この方式は2指グリップの対象物形状に対する適応性の低さと、多

Fig.6 Design of hand mechanism

関節指の把持安定性の欠如, 制御の複雑さを回避したもので, 両者の中間的位置にあるものと考えられる. 精密位置補償に関しては指の自由度に加え, 手首の板バネ式の4自由度コンプライアンス機構により実現した. また, コンプライアントな馴染み機構を直動指に採用し把持の多様性と安定性を増した. これらの三つの機構は微細な位置や力を調整する柔らかい指と手首として働き, 搭載計算機への過度な負担を避けつつ, 把持の多様性, 信頼性, 精密作業性を与えることができた[7]. 多重センサに関してはハンドアイカメラ, レーザビーム式近接距離センサ, コンプライアンス機構に付けた微小変位センサ, 指の圧覚センサ, 手首の力・トルクセンサの5種類をハンド回りに集積させ, マクロからマイクロなセンシングを行う. また, 日陰時にも微細作業ができるよう低消費電力の赤色LEDアレーによる照明を備えた.

ハンドのフライトモデルの外観をFig.7に示す. ハンドのハウジングには指およびコンプライアンスロック機構を駆動するアクチュエータとその制御インタフェース, および多重センサ信号を処理しアームとシリアル通信する信号処理部を組み込んだ. コンプライアンスロックは主としてアーム移動中に働かせ, 手先の振動を抑制し速やかな高精度位置決めを可能とさせる. ハンドの手首部には結合フィクスチャを取付け, インタフェースを標準化することにより各種のロボットアームと結合可能にした.

3.3 打ち上げ固定と軌道上再構成

3.3.1 アーム固定機構

ロボット機構は打ち上げ時には耐振動・衝撃と容積制限のため, 収納姿勢で固定し, 打ち上げ後自力で作業形態に再構成する必要がある. 打ち上げ時の振動・衝撃は非常に過酷で, シリアルリンクの多関節アームでは固定法が大きな課題となる. ここでは固有振動数80Hz以上を固定剛性の目標値とした. 固定点を増すと剛性は増すが, 重量増や解放時の信頼度の直列接続による低下を招くため十分なトレードオフが必要である. そこでいくつかの固定法に対し, I-DEASを用い数値構造解析を行った. Fig.8にその代表ケースを示す. (a)はアームにハンドを結合した状態でハンドを固定する方式, (b)はハンドを分離して別に固定し, アームの手首を固定する方式, (c)は(b)方式の剛性をさらに高めるため肘部

Fig.7 Flight model of the hand

	Launch configuration	Minimum structural frequency (Hz)		Acceleration * (G)
		Analysis	Modal survey	
a	Arm/hand connection	70	50 (x)	20
b	Arm/hand separation	98	85 (z)	25
c	Arm/hand separation + Elbow latch	-	130 (y)	-

* Acceleration amplitude at minimum structural frequency in 1G modal survey

Fig.8 Launch configurations of robot arm and structural frequency

も固定する方式である. 解析では関節はベアリングの曲げ剛性と縦剛性およびハーモニックドライブのねじり剛性をもつ梁にモデル化し, 固定部は完全固定とした. その結果, 目標を満たす(b)および(c)を候補とした. 解析ではクランプなどの接触固定要素のモデル化が困難なので, 次に実機相当の関節と固定機構を用いた機械構造モデルを試作し共振点探索と1[G]に対する増幅率を調べた. 数値解析より固有振動数が2割程度低くなっていることがわかる. 方式(b)では固有振動数の要求は満たすが増幅率が25となり, Z軸25[G]の正弦波振動条件では数百[G]に相当する加速度が励起され破損することが明らかとなった. したがって, 正弦波加振範囲(15~100[Hz])に共振モードを持たない(c)方式

を採用した。

3.3.2 軌道上再構成

次に打ち上げ形態から作業形態に再構成する方法を述べる。アームの固定の解除は、「ツール内クランプ爪解除 (Fig.5 参照) → 肘固定機構解除 → 手首固定機構解除 → 手首引き上げ」のシーケンスで行う。振動試験の際、手首フランジの予圧固定面で微小繰り返し摩擦のため凝着が起き手首が解放されない場合が生じた。そのため、手首の引き上げは以下の手順で行う。

i) 肩ピッチ、肘ピッチ関節以外をリンプモード(サーボ制御をオフとする)とし、力制御のもとでステップ状に微小引き上げを行う。力が閾値を超えた場合は微小量戻した後、微小引き上げを続ける。

ii) 引き上げ不能ならばモータ励磁による全軸微小動作後、i) の微小引き上げを行う。

iii) さらに引き上げ不能ならば、手首ロールを微小回転/反転させた後、i) の微小引き上げを行う。

方法 i) は振動中に生じたアームリンク機構の残留歪みを解放する効果がある。ii) は全軸を摂動させることによりアームリンク機構の残留歪みと軽度の凝着を解放しようとするものである。iii) は一般に凝着力は面外方向には大きい、剪断方向には小さいことから行うものである。このように多関節アームの特徴を利用した引き剥がし動作により振動試験で生じた凝着から解放できることが確かめられている。

次にアームとハンドを結合するわけであるが、結合手順は「ツール部をハンド結合位置へ誘導→力制御により挿入→ツール内クランプ爪でハンドを結合→ツール内トルクドライバでコネクタをスライド結合」とする。ここで問題となるのは打ち上げの際に生ずるであろう位置ずれを吸収しかつ過負荷がかからないようにツールを挿入することである。ここではハンドとアームの結合インタフェースにガイドを設けるとともに力制御を導入した。まず、ガイドに関しては Fig.9 に示すようにクラウン部内面を並進ガイドとしアーム側3本爪の側面がこれにならうようにする。また、クラウン部の段の側面を回転方向のガイドにする。これらのガイドは挿入時に時系列的に並進方向(x,y)の誤差吸収の後に回転方向(θ_z)の誤差吸収がなされるよう位置関係を設計する。並進誤差吸収では接触点での荷重ベクトル(F_x, F_y)を力センサ値から算出し、力制御により3本爪側面をクラウン部内面にならわせて挿入する。回転誤差を吸収できる深さまで挿入したら、次に、手首ロール軸をサーボオフとしリンプモードにする。これによりガイドにならって回転誤差が修正される。Fig.10 にこの方法によるハンド結合時のデータの一例を示した。ここで初期誤差は並進方向に 5 [mm]、回転方向に 0.5 度与えているが、接触後約 50 秒で並進誤差が修正され、その後約 60 秒で回転誤差が修正されている。先端力 10 [N] 程度でハンド結合が行われているのがわかる。この方法により並進 ±7.5 [mm]、回転 ±2 度の誤差に対しハンドを結合できることが確かめられた。

4. 多重センサによる精密作業

4.1 基本戦略

ここでは精密作業を行うための搭載系の計測・制御の基本戦略を述べる。一般に大きな宇宙施設で作業を行う場合、精密アーム

Fig.9 Mechanical interface of arm/hand connection

Fig.10 Position error and force during hand connection

は大型アームやトランスポータなどで粗位置決め後使用される。ここでは ±50 [mm] の位置決め誤差を前提としてサブミリの精密作業を行うことを考える。そのため Fig.11 に示すように、非接触、接触の多重センサによりアーム/ハンドを用い能動的にマクロからマイクロの階層的な計測を行う。ここで近接距離センサは手首円周上に3等配して取り付けられており、ハンドアイカメラと近接距離センサの光軸は手首ロール軸と平行になるように取り付けられている。まず、ハンドアイカメラにより対象物を探索後、その近傍で作業面に対して3個の距離センサ値が等しくなるよう手首姿勢を制御する。これによりハンドアイカメラ軸は作業面に対し垂直化され、正面図に相当する画像が得られる。この正面画像を処理することにより対象物の位置・姿勢を容易に知ることができる。また、垂直化により局所垂線 (z 軸) が得られているので、対象物近傍の作業面上に単位座標ベクトルを規定する印を付けておくとその画像から x-y-z の局所座標系を生成できる。この局所座標系での部品の位置を既知とすれば座標系の生成精度とアームの相対精度で決まる位置決め精度で作業可能となる。

次に近接距離センサを走査し対象物とその近傍の作業環境の断

Fig.11 Measurement and control strategy using multisensors

面図に相当する深さ方向のプロファイルを得る。これでハンドの近接ナビゲーションに対する戦略が決定できる。ハンドの移動は力センサのモニタのもとで行い、万一の衝突による損傷を防ぐ。

次に、非接触センサの誤差を吸収するため接触センサベースの微小補正を行う。対象物を把持する際は把持力センサでモニタしながら片方の回転指を閉じていく。接触が検出された時点で止め、もう一方の回転指を接触するまで閉じる。両方の回転指の角度差が許容値外の場合は把持安定性を得るため、偏差に応じて手首の位置・姿勢を微調整し再把持するプロセスを繰り返す。収束後、直動指を閉じ、把持力を制御しながら対象物をしっかりと把持する。この方法によると初期位置誤差があっても対象物にストレスを与えず把持可能となる。コンプライアンス機構は上記の非接触センサに基づくアームの位置決め最大誤差(±1.5 [mm])を板バネにより吸収する。中心からの偏差による板バネの作用力が好ましくない場合や、偏差を残したままの挿抜が好ましくない場合には、コンプライアンスセンサにより検出した変位量をアームの位置制御にフィードバックして微小補正を繰り返して低減する。これによりアームの相対位置決め誤差以下に挿入軸の中心を合わせることができる。このアルゴリズムはコンプライアンス機構で吸収できない大きな誤差に遭遇した場合にも、コンプライアンス機構の適用範囲(±1.5 [mm])まで追い込むために使用する。

さらに大きな誤差の場合は、力センサによる疑似コンプライアンス制御を行う。挿入軸のアライメントは近接距離センサにより高精度に設定できるので x , y , θ_z の3軸について力制御を行い、 z 方向(挿入軸)は一定のストロークで移動させる。すなわち、挿入しながら反力を検出し、閾値を超えた場合に以下の補正を行う。

$$\begin{aligned}\Delta x &= M_x / k_1 \\ \Delta y &= M_y / k_2 \\ \Delta \theta_z &= -k_3 M_z\end{aligned}\quad (1)$$

ここで k_1 , k_2 , k_3 は補正ゲイン, M_x , M_y , M_z はトルクである。 x , y 方向の補正にトルクデータを用いているのはセンサから接触点までの距離が約15 [cm]と長いので力データより分解能が向上するためである。この簡易補正法により±5 [mm]の位置誤差が吸収できることが確かめられた。

4.2 適用例と評価

上記の基本戦略の具体的適用をボルトファスナの着脱を例に述べる。この種の作業はかじりが起こらないようハンドとボルトの回転軸の位置と方向を精密に調整する必要があり、特に固体潤滑膜を用いる宇宙用のボルトファスナではクリティカルな作業要素の一つである。Fig.12に模式的に作業環境を示す。ボルトを外しポートにねじ込む。ここでボルトのサイズ、ピッチ、ねじ込み深さは未知とする。まず、ボルトヘッドをハンドアイカメラで探索し、ヘッドの六角形の位相に対する指の接近計画を決定する。次に前述のように近接距離センサにより $D_1=D_2=D_3$ となるように局所垂線(Z軸)を設定し、次いで作業パネル面に設けた二つの円マークを画像計測して原点とY軸を設定する。Table 3に近接センサと視覚センサを複合利用して生成したベース座標系に対する作業パネルの局所座標要素を機械的計測値と比較して示す。座標系の生成精度は位置±1 [mm]、姿勢0.3度以下が達成されている。したがってハンドアイカメラの視野が座標マークをとらえる程度に粗位置決めすれば、アーム相対精度は±0.5 [mm]以下なので最悪で±1.5 [mm]以下の局所位置決め精度が得られることになる。

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。ボルト垂直軸のアライメント合わせは三つの近接センサの距離情報を用いて行い、中心合わせは指の接触センシングで行う。Fig.13に中心合わせ時の3指A, B, Cの位置(L_a , θ_b , θ_c)、B指の圧覚値(F_b)、アームの位置補正量(dX , dY)を示す。まず、回転指BとCが閉じていき、約20秒でボルトヘッドに接触している。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を動かしボルトを把持する。B, Cの指の閉じ角(θ_b , θ_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

Fig.12 Situation of bolt fastener handling task

Table 3 Coordinate generation by hand sensors

Coordinate element of panel	Hand sensor measurement	Mechanical measurement
X (mm)	389.713	389.252
Y (mm)	434.532	435.326
α (deg)	17.098	17.099
β (deg)	104.72	104.573

アームの水平方向位置を調整する。ここでは $dX = 1.66$ [mm], $dY = 0.28$ [mm] の調整が行われている。再把持を行うとアンバランスは解消され中心合わせが完了しているのがわかる。次にボルトの脱作業を手首ロール軸を回転して行う。その時のアームのZ方向位置(Z), Z方向の力(F_z)とトルク(M_z), 指の圧覚値を Fig.14 に示す。ここでは F_z と M_z をモニタしながら 60 度ステップでボルトヘッドを回し, 180 度回した時点で微小引き抜き動作を行い, 抜けたかどうかを反力 F_z で判断する。ここでは反力が認められたので, 次の180度回転のためボルトの持ち換えをするわけであるが, ボルトが抜ける寸前の状態にあると宇宙空間に放出する恐れがあるので, 60 度反対方向にねじ込んでいる。その後, 同様の動作を繰り返してボルトを外す。

ボルトの挿入の際の中心軸合わせは, コンプライアンスセンサを用いて水平方向変位が閾値内に収まるまで挟み撃ち法でアームの位置を微小調整して行う。挿入時の過渡衝突力はコンプライアンス機構により 7 [N] 程度に緩和された。力センサを用いる能動的コンプライアンス制御では制御遅れのためこの数倍のピーク値となるので, このコンプライアンス機構は剛性の高い対象物の精密嵌合作業に適している。

このようにして多重センサとハンドメカニズムを利用することにより従来の方法では不可能なサイズ, ピッチ, ねじ込み深さが不確定な場合のボルトファスナの着脱が可能となった。同様に前

Fig.13 Position adjustment by finger contact sensing

Fig.14 Multisensory control in bolt screwing

節に示した多重センサベースの作業戦略を応用することにより, Fig.4 のタスクボード上の D-Sub 電気コネクタ, ソーラーセルシート, 熱ブランケット, ワイヤ, ピンセットなどに対する各種の精密作業を信頼性高く行えることが地上試験で確認できた [9]. 軌道上での実験結果と評価については今後報告する予定である。

5. 開発システム

開発したフライトモデルの各コンポーネントを Fig.15 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。各重量はそれぞれ 7.1, 26.6, 0.7, 8.7 [kg] である。従来の宇宙ロボットシステムが 100 [kg] 以上なのに対し, 格段の軽量型システムを実現できた。制御計算機は衛星通信系とのテレメトリ/コマンドの通信処理, 画像取得・処理, 温度制御およびハンド, アー

Fig.15 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)

ムの制御などを行なう。MPUには80386/387を用い、ROMは128 [kB], RAMは256 [kB]としている。アームのサーボ制御にはDSP (MB8764) を用いている。打ち上げのため、ロボット実験部には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。電源装置は衛星の非安定バス電源 (32.5 ~ 52VDC) から各制御部の定電圧電源を作るDC/DCコンバータと、アクチュエータドライバ、熱制御ヒータのドライバおよびハンドアイカメラのコントローラなどからなる。Fig.16で写真上は単独実験の形態でタスクボードの部品を扱う地上試験の様子を、下はハンド/大型アーム結合形態でターゲット衛星上のタスクパネルの部品を扱う地上試験の様子を示す。

フライトモデルは機能・性能試験、電磁干渉試験、振動試験、熱真空試験などを経た後、衛星に組み込まれ、システムレベルの電気系や通信系との適合性試験、振動試験、衝撃試験、熱真空試験を完了した。Fig.17に衛星の地球指向面に搭載されたロボット実験装置を示す。

6. 結 び

技術試験衛星VII型に搭載し部品レベルの精密作業を行うテレロボットのシステム設計とフライトモデルの開発について述べた。3指多重センサハンド、小型アーム、タスクボード、制御計算機、電源装置からなるコンパクトで高機能なロボット実験装置を開発し、衛星に搭載可能なシステムを実現した。打上げ環境および宇宙環境条件を満たすロボットメカトロニクス設計、アーム固定法および軌道上で作業形態に再構成するためのアーム解放とハンド結合法を示した。さらに、位置誤差を含む状況で精密作業を行うため、ハンドメカニズムと多重センサを用いた計測制御法を述べ、サブミリの精密作業が可能であることを示した。ここで述べた開発技術の多くは、小型、高機能、精密さが要求される次世代宇宙ロボットに広く応用しうるものと考えられる。なお、このテレロボットシステムは1997年11月に打ち上げられ、4カ月の軌道上待機の後、初期点検が行われ、正常に機能することが確かめられている[10]。

Fig.16 Working configuration in robot experiment (upper: Stand-alone mode, lower: Long-arm connect mode)

Fig.17 Robot experiment unit of the precise telerobotic system boarded on ETS-VII

謝 辞 本システムの開発にあたり御協力いただいた宇宙開発事業団およびUSEF技術委員会の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] H. Borduas, D. Gossain, A. Kong, E. Quittner and D.S. Haffer: "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, 戸田, 秋田: "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, 97-12-7, 1997.
- [6] M. Oda: "Engineering Test Satellite VII: Rendezvous, Docking and Space Robot Satellite," i-SAIRAS'97, 1997.
- [7] 村瀬, 石井, 駒田, 町田, 秋田: "宇宙ロボット用3指多重センサハンドの開発", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.124-133, 1998.
- [8] K. Machida et. al.: "Precise Space Telerobotic System Using Three-finger Multisensory Hand," IEEE Int Conf. on Robotics and Automation, pp.32-38, 1995.
- [9] "精密テレロボティクス", <http://www.etl.go.jp/5822/spacerobot/precise.html>
- [10] "高機能ロボットハンドの宇宙実験", <http://www.etl.go.jp/5822/ARH/index.html>

町田和雄 (Kazuo Machida)

1945年8月31日生。1970年北海道大学工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年、電子技術総合研究所へ入所。以後、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。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、計測自動制御学会、日本航空宇宙学会、AIAAなどの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

三上龍男 (Tatsuo Mikami)

1952年8月28日生。1978年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。同年、富士通(株)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等に従事。宇宙開発推進室第二開発部長。

秋田健三 (Kenzo Akita)

1943年2月27日生。1965年、富山大学文理学部理学科卒業。同年、神戸工業(株)へ入所。1968年、合併により富士通(株)に転籍。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長。高機能ロボットハンドの開発に従事。工学博士。