

センサ融合テレロボティクスによる宇宙における 遠隔精密作業と遠隔センシング

町田 和雄^{*1} 戸田 義継^{*1} 三上 龍男^{*2} 駒田 聡^{*2}

Precise Task Execution and Tele-Sensing in Space by Sensor-Fused Telerobotics

Kazuo Machida ^{*1}, Yoshitsugu Toda ^{*1}, Tatsuo Mikami ^{*2} and Satoru Komada ^{*2}

This paper presents the concept of sensor-fused telerobotics and its application to the space test of the 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 system was launched, and its capability was successfully demonstrated in space. Integrated utilization of the five kinds of sensors and three-fingers are effective to perform precise tasks under the barrier of inter-satellite communication. Telesensing that acquires the work database interactively using the multisensory hand was introduced to overcome uncertainties in space tasks.

Key Words: Telerobotics, Sensor-Fusion, Space Robot, Telesensing, Remote Teaching, Multisensory Hand

1. はじめに

21世紀初頭には宇宙環境利用がさらに進展し、危険な宇宙船外で人間に代わり作業するロボットが期待されている。これまで宇宙のロボットは大きな対象物の運搬、着脱を主目的に開発されてきた[1][2]。今後は小型の部品に対し精密作業を行うロボットが望まれる。このような実験として ROTEX が知られているが[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、過酷かつ作業環境が変動する宇宙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み込まれており、無人化に対応していない。さらに、エンドエフェクタは1自由度グリップ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。筆者らは世界に先駆け無人宇宙船外で精密作業を行うテレロボットを開発し、技術試験衛星(ETS-VII)において宇宙実験を行った。

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[4]、仮想モデル[5]、遠隔・自律共有[6]~[8]など、多数の研究が行われてきた[9]。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、上にあ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。また、精密さを要求される作業では、作業対象や環境の正確な把握が必要であるが、従来の研究はテレビカメラと力センサでのモニタによるものがほと

んどで、軌道上の精密作業に適用しうるものではなかった。遠隔精密作業には、精密補償制御とともに、逐次、軌道上の作業環境を知るため、遠隔操作の対となる「遠隔センシング」ともいうべき技術が不可欠と考える。

我々は、宇宙との通信バリアのもとで多様な精密作業を確実に実行するには、多数の局所センサ情報を融合し、精密補償と遠隔センシングを核としたテレロボティクス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[10]、宇宙におけるセンサ融合テレロボティクスの精密作業実験を行ってきた[11]。今回、さらに、遠隔センシングの実験を行ったので、これまでの成果と総合して報告する。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、次にその実現の鍵となる多重センサハンドの設計とセンサ融合に基づく精密補償、遠隔センシングの手法、および操作インタフェースについて述べる。次いで、これらを適用した宇宙における精密作業実験と遠隔センシング実験の結果と評価を述べる。

2. センサ融合テレロボティクスの概念

T. Sheridan によると、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[9]。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。通信容量が小さ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す。実際、我々の

原稿受付 2000年3月7日

^{*1} 電子技術総合研究所

^{*2} (株)富士通

^{*1} Electrotechnical Laboratory, MITI

^{*2} Fujitsu Ltd.

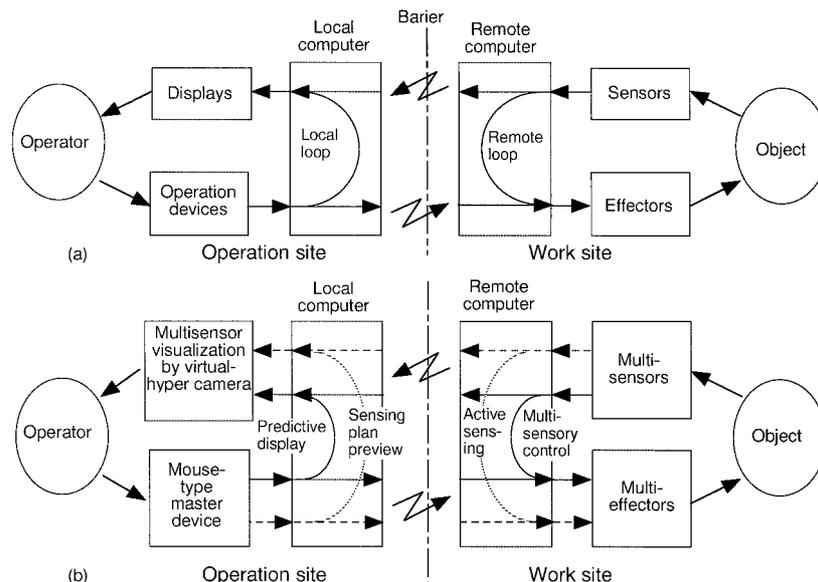


Fig. 1 Structure of telerobotics (a: Sheridan's concept, b: Proposed concept of sensor-fused telerobotics)

経験では10 [mm]程度の案内を設けた軌道上交換装置の着脱は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、予測できない状態になることもある。第三は作業空間の広い宇宙の精密作業では移動装置、腕、指など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ー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、すなわち遠隔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遠隔センシングの流れを示し、操作側では計測計画、作業側では能動的計測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ティクスと呼ぶ。次に個々の具体化について述べる。

3. 3指多重センサハンドとセンサ融合

第一と第二の課題に対応するためFig. 2に示す3指多重センサ

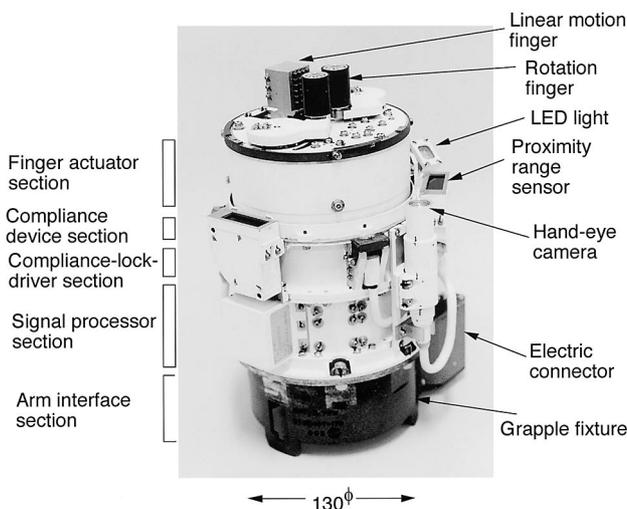


Fig. 2 Flight model of the three-finger multisensory hand

ハンドを開発した。

3.1 ハンド機構

3.1.1 指機構

従来の宇宙ロボットに用いられているエンドエフェクタは1自由度ツールで、対象物に把持用フィクスチャを必要とする。そのため、対象物の構造の制約や大型化をもたらし、小さい、あるいは多様な形状の部品を扱うには困難が伴う。また、1自由度では指によるマニピュレーションはできない。器用さを増すには多指ハンドが望まれ、多くの研究が行われてきた[12][13]。一般に指の数は多いほど器用さは増すが、4本以上ではその向上率は小さいことが知られている。また、多関節指は機構の信頼性に欠けること、把持安定性や制御の複雑さが問題となる。宇宙の作業では不用意に把持物体の向きが変わったり、あるいは「落とす」ことは作業が遂行できなくなるばかりでなく、安全上も許されない。

また、放射線により宇宙用計算機の能力は制限され、多関節指の使用は現状では不相当である。以上のトレードオフから、精密な位置と力の制御が可能で、かつ、シンプルで信頼性の高い機構の3指ハンドを考案した。指の自由度配分をFig. 3に示す。親指に相当する直動指Aと、人差し指、中指に相当する回転指B、Cからなる。各指は1自由度であり、合計3自由度となる。把持物体が半径Rの円柱の場合は、回転指Cの角度を θ 、直動指の開度をaとすると、幾何学的関係から

$$R = \frac{a^2 + L^2 + W^2 - r^2 + 2aL \cos \theta - 2LW \sin \theta}{2(a + r + L \cos \theta)} \quad (1)$$

となる。これから、指の形状空間(θ, a)における正規化半径 R/L の等高線をプロットするとFig. 4のようになる。図では、簡単のため、指の径 r が指の実効長 L に比べ無視できるほど小さく、 L と指間隔 W が等しい場合($r/L=0, W/L=1$)を示す。この図は半径 R の円柱を掴むために必要な回転指の角度と直動指の変位の組み合わせを与え、把持計画に使う。また、 θ, a の可動範囲を与えると、把持可能なワークスペースを知ることができる。 $a=R$ と選ぶと、円柱とハンドの中心軸を一致させることができ、最も操作しやすい把持状態となる。この関係を式(1)に代入すると、 θ, a の関係は

$$a = \sqrt{L^2 + W^2 - 2LW \sin \theta} - r \quad (2)$$

となる。図の太線はこの関係をプロットしたものである。

上述の関係は三角形、長方形、六角形などの代表的な部品形状に対しても同様に求めることができる。また、不規則な形状の物体でもハンドカメラから得られる外形をこれらの包絡線で近似することにより把持計画が立てられる。

指の圧覚は図の(b)に示すように、回転指のL字型リンクに張り付けた歪みゲージで検出する。垂直抗力のみを得るため、直交した二つのリンクの曲げモーメントを測る。各歪みゲージの検出電圧 V_1, V_2 は、

$$V_1 = k_1 L_1 F \sin \beta \quad (3)$$

$$V_2 = k_2 L_2 F \cos \beta + k_3 L_3 F \sin \beta \quad (4)$$

となる。ここで、 k_i は出力特性係数、 L_i はモーメントアーム長、 β は指の接触角である。上式から垂直抗力 F を求めると、

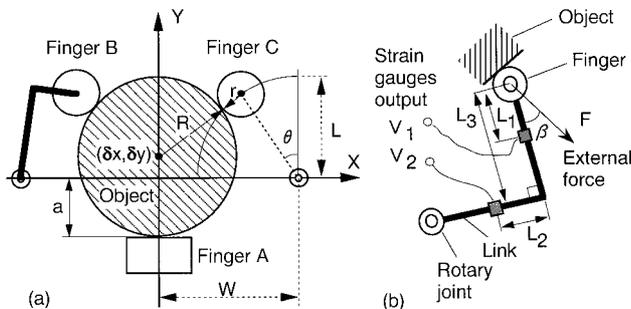


Fig. 3 Schematics of finger module (a: Finger arrangement, b: Grip force sensor)

$$F = \frac{\sqrt{(k_2 L_2 V_1)^2 + (k_1 L_1 V_2 - k_3 L_3 V_1)^2}}{k_1 k_2 L_1 L_2} \quad (5)$$

となる。これにより等方的に接触抗力を測定でき、多様な形の物体に対して把持力の計測・制御が可能となる。また、指を押しつけて、高精度の力の印加に利用することができる。

Fig. 5に指機構の具体的な構造を示す。直動指Aは直流ブラシレスモーターとボールネジにより駆動する。回転指の駆動には軽量化のためステッピングモーターと遊星ギアを用いた。位置分解能は直動指で50 [μm]、回転指で5 [μm]である。物体を把持する場合、回転指B、Cを閉方向に動かし物体に接触した時点で停止させ、次に直動指を動かし掴む。このようにすればアームの中心軸が対象物のそれとずれていてもストレスを与えず把持することができる。把持後は回転指は位置保持モードで、直動指は回転指に作用する力を帰還する力制御モードで動作させる。

直動指の腹にはバネで予圧したピンの行列による、コンプライアントな馴染み機構を設けた。回転指は把持物とは点接触に近い状態なので、この機構で直動指に面接触の機能を与え、把持の安

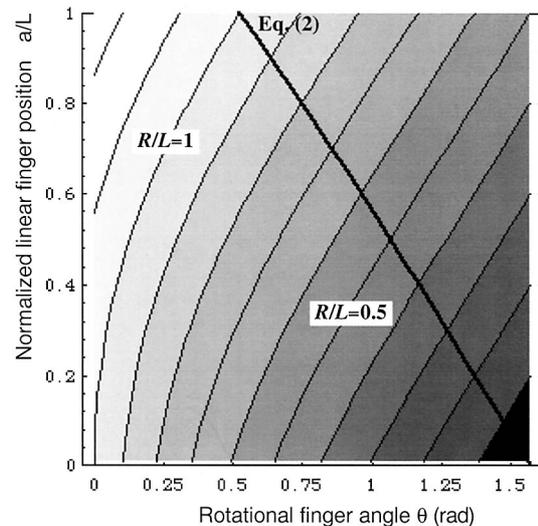


Fig. 4 Configuration space of three-finger module

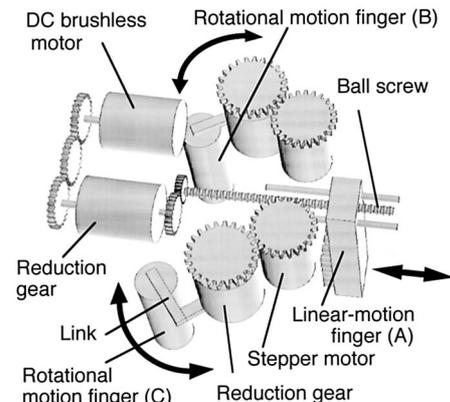


Fig. 5 Mechanism of three-finger module

定性を増すことにした。物体を把持した際に各ピンが表面形状にならって引っ込み、その変位に応じた力がスプリングにより物体に作用する。これは把持力を均等に分散させ、多様な形状の物体を安定に把持する効果を与える。さらに、把持物体にノッチを設けることにより、ピンによる指の接面方向の動きを拘束でき、物体のスリップや宇宙空間への放出を防ぐ効果を持たせた。

3.1.2 手首コンプライアンス機構

制御計算機の負荷を増すことなく精密位置補償するものとしてコンプライアンス機構があり、リモートセンタコンプライアンス(RCC)などが知られている。従来のコンプライアンス機構は軸形状が長い、アームの移動時に振動が発生し精密位置決めが損なわれるなどの難点があるほか、打ち上げ時の振動・衝撃への対策が難しいなど宇宙用としての問題がある。そこで我々はハンドに内蔵可能な、薄型で、かつ、ロック機構を備えた手首コンプライアンス機構を新たに開発した。Fig. 6 にその構造を示す。固定ベースにアーム先端が、可動ベースにハンドが取り付けられる。可動自由度は4で、矩形に配した板バネで x 、 y 、 θ_z 方向のコンプライアンスを与え、それに支持されたクローバー状の1対の板バネで z 方向のコンプライアンスを与える。コンプライアンス値は x 、 y 方向に 0.15 [mm/N]、 z 方向に 0.075 [mm/N]、 θ_z に 3 [deg/Nm] としている。可動範囲はストッパにより、並進方向に対し ± 1.5 [mm]、回転方向に対し ± 2 [deg] に制限している。 x 、 y 、 θ_z のコンプライアンスは主として挿入作業時の誤差吸収に用いる。 z 方向は把持する際の軸方向の誤差吸収や、組立部品の引っ張りによる締結確認の際の伸び代として利用する。板バネには歪みゲージを貼り、微小変位が検出できるようにしている。可動ベースの中央にはロック機構を設け、手首を柔軟な状態(アンロックモード)と剛な状態(ロックモード)にできるようにした。ロック機構は、三つ葉状の回転子の先に吸着させた鋼球を、可動部に設けた三つのV溝に押し付けて、全自由度を拘束する。通常、アームの移動時はロックモードとして振動を抑制し、接触により力センサ信号が閾値を超えるとアンロックモードに自動遷移させて用いる。

3.2 多重センサによる精密補償

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レーザー式近接距離センサを配置した。また、接触センサとして上述のコンプライアンス変位センサと指圧覚センサ、および力・トルクセンサを配置した。Table 1 に各センサの主要諸元を示す。この5種類のセンサを用いて精密作業に必要な制御を行う。Fig. 7 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、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階層的あるいは融合的に利用し、自律性と精密作業性を向上させる。まず、ハンドアイカメラと距離センサを用い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での画像計測や距離センサの精走査による相対位置計測を行う。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。その後、力・トルクセンサ、コンプライアンス変位センサ、指圧覚センサを用い、非接触センサに含まれる微小誤差を補償しながら、物体を把持し、これらの力情報を総合的に用いて接触操作を行う。

具体的には、指圧覚センサによる精密位置補償は次のように行

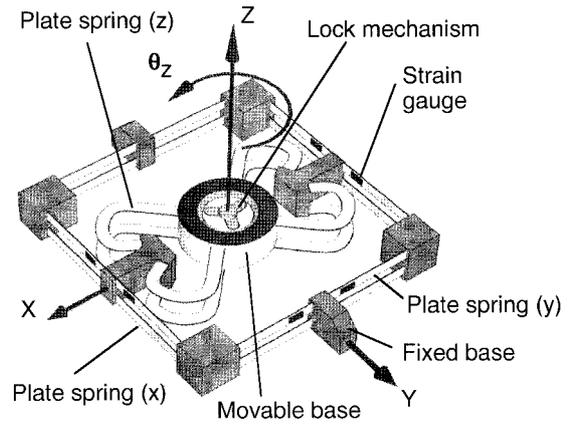


Fig. 6 Schematic of wrist compliance device with lock mechanism

Table 1 Specifications of hand sensors

Sensors	Specifications
Grip force sensor	Range: 0.7~25N Accuracy: ± 0.7 N
Wrist displacement sensor	Range: ± 1.5 mm (x , y) ± 2 deg (θ_z) Accuracy: ± 0.05 mm (x , y) ± 0.1 deg (θ_z)
Force/torque sensor	Range: 50N (F_x , F_y), 100N (F_z) 4.9Nm (M_x , M_y , M_z) Linearity: 0.4%
Proximity range sensor	Range: 0~80mm Accuracy: ± 1 mm Misalignment allowance: 25deg
Hand eye camera	Field of view: 85x64mm Resolution: 0.14mm (at 40mm distance)

う。まず、圧覚センサを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把持する。

挿入作業でのコンプライアンス変位センサを用いたアームの位置補正法をFig. 8に示す。挿入時に変位センサで水平方向変位を測定し、その変位に応じてアームの水平位置を微小移動させる位置調整を繰り返すことにより誤差を収束させ、挿入軸の中心を合わせる。この方法によると、コンプライアンス機構の可動範囲を超えた位置ずれも調整できる。この補償制御は作業側(宇宙)で行われるので、地上の操作者は誤差を含んだグラフィックシミュレータ上のモデルを用いて位置指示しても、自律的に補正し精密挿入作業が可能となる。さらに大きな誤差の場合は、力センサによるコンプライアンス制御を併用する。

これらの非接触センサおよび接触センサベースの補償戦略により逐次誤差を狭め、 ± 50 [mm]の初期位置誤差から 10 [μ m]のクリアランスの挿入作業が可能となることが、地上試験および宇宙で確かめられている。

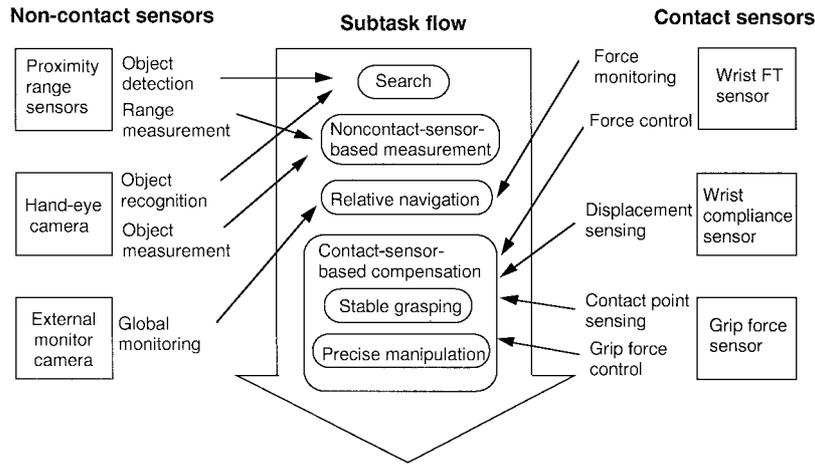


Fig. 7 Basic strategy for precise task execution using multisensors

3.3 遠隔センシング

第二の課題に対応するためハンドの多重センサを用い、地上から遠隔センシングを行う。これは不確定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望ましく、更新された作業モデルに基づく指令の誤りも少なくなる。そのためには、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、断面像があると精確な指示がしやすい。そこで Fig. 9 に示す基本戦略を採る。すなわち、ハンドアイカメラの光学軸を作業面に垂直に向け正面像を得る。また、近接距離センサで作業環境を走査し奥行きプロファイルを得る。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除去する。

この戦略では作業面に対するカメラ軸の垂直化が自律かつ容易にできる必要がある。そのため Fig. 10 に示すようにレーザー近接距離センサをハンド周りの半径 R の周に 3 等配する。ここで各距離センサの光軸はカメラ軸と平行とする。3本のビームが局所作業面に当たる3点で形成される平面の方程式は、各ビーム長を h_1, h_2, h_3 とすると

$$z = \frac{h_3 - h_1}{\sqrt{3}R}x + \frac{2h_2 - h_1 - h_3}{3R}y + \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \quad (6)$$

と表され、原点 O_1O_2 間の距離は

$$h_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \quad (7)$$

となる。したがって、距離センサで h_1, h_2, h_3 を測定することにより、カメラ軸の作業面に対するアライメントや距離を即座に制御できる。特に、垂直化の条件は $h_1 = h_2 = h_3$ であり、カメラ軸の垂直化を容易に行うことができる。正面画像が得られると対象物の図心まわりに容易に局所座標を生成でき、精密作業の基準軸が得られる。また、作業面との距離が測定されるので正面画像のスケール対応も容易である。このことはハンドアイカメラの画像に基づく操作者とのインタラクティブな遠隔センシングの効率を著しく向上させる。さらに、 h_1, h_2, h_3 のテレメトリデータから式 (6) を用いて局所作業面 $A_2B_3C_2$ を計算機グラフィックスで操作

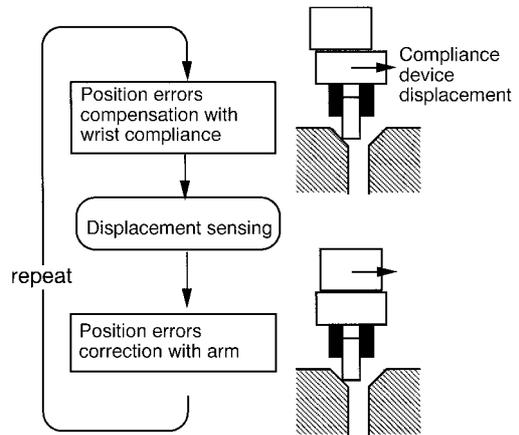


Fig. 8 Compensation range expansion for position errors

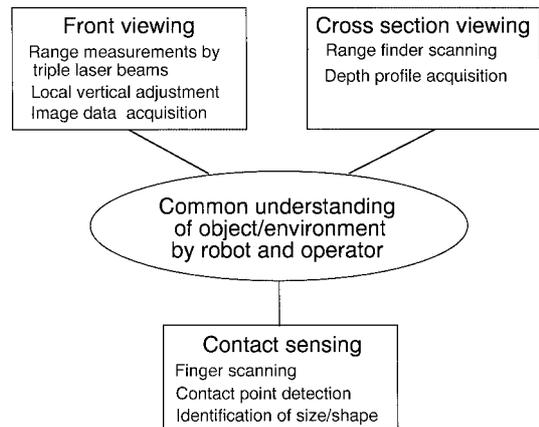


Fig. 9 Basic strategy for tele-sensing

者に提示できる。このグラフィックス上に生成された平面を仮想作業面と呼ぶ。これはカメラなしで生成できるのが利点である。次に作業対象の側面像であるが、多くの場合、対象物の側面はカメラが回り込めない、物体に遮られるなどの理由で撮像が困難な場合が多い。そこで、距離センサを正面から走査し、距離プロ

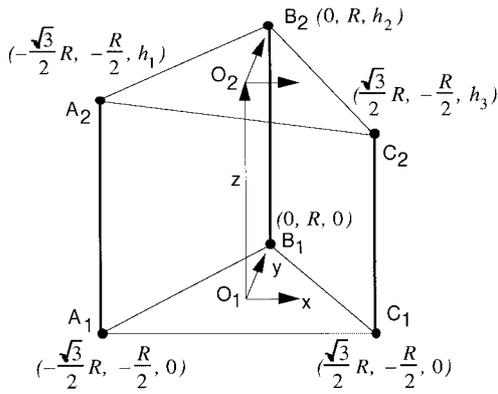


Fig. 10 Local virtual plane generation by range sensors

ファイルから疑似断面図を得ることにする。ここでは、アームの経路追従の動的揺らぎを避けるため、ハンドを対象物上空にもっていき、手首ロール軸すなわちハンド中心軸Zを回転して走査する方法を主に用いた。走査の経路計画は次章に述べる操作インタフェースを用い、正面像からディスプレイ上でマウスなどにより指示することができる。

指による接触センシングでは回転指を動かし、指センサが物体との接触を検出したときの回転角から物体の位置や接触点を割り出すのに用いる。円筒の対象物ではハンド中心位置に対する円の中心の偏差 $(\delta x, \delta y)$ は次のように表される (Fig. 3(a)参照)。

$$\begin{aligned} \delta x &= W - L \sin \theta - \lambda(R+r) \\ \delta y &= R - a \end{aligned} \quad (8)$$

ここで

$$\lambda = \sqrt{1 - \left(\frac{R-a-L\cos\theta}{R+r} \right)^2} \quad (9)$$

同様の関係は回転指Bの関節角からも得ることができる(ただし式(8)の δx において右辺の符号は反転する)。したがって、直動指Aの開度 a およびいずれかの回転指の角度 θ から、ハンド中心に対する円筒中心の相対位置を知ることができる。正多角形の対象物に対しても同様の考えで測定できる。また、指を対象物の大きさを正確に測るゲージとして利用することができる。長方形の物体では指の位置分解能に応じた精度で寸法を測定できる。この touch-and-know のストラテジは、後述するようにモデルが曖昧な状況でデリケートなものを扱う際に非常に有効であった。

4. デスクトップ型操作インタフェース

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・インタフェースを構築した。

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、三次元的に移動可能な機構が用いられているが、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、操作者はモニタカメラや

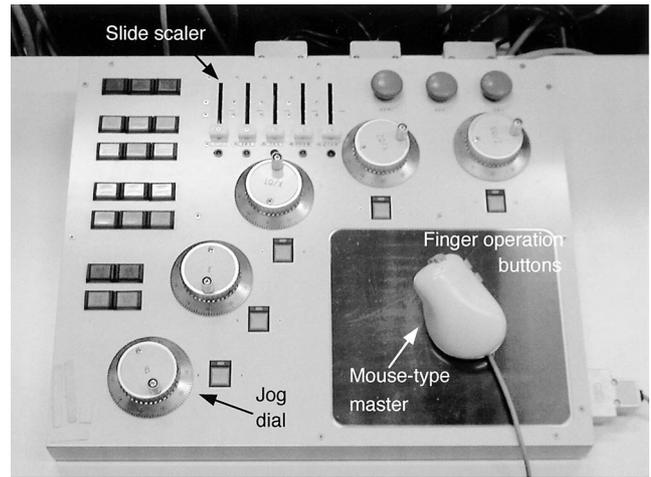


Fig. 11 Desktop operation device (Mouse-type master and operation box)

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、これらは二次元像であるため、画像平面内と奥行き²の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操作では、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、二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. 11 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握り先端に指の操作ボタンを付加したものである。操作者はロボットの作業内容に応じて選択した座標系の二つの座標成分を指令する。このとき、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、操作者のマウス操作とロボットの画面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. 12 に示すようにディスプレイの3指近傍の正面図と側面図に対応する操作平面座標系(a)あるいは(b)を選択し、ハンドの先端位置をディスプレイ上で目的の位置まで移動させる。例えば、接近フェーズでは側面図に注目しながら座標系(b)で操作し、把持位置の水平合わせのフェーズでは正面図に注目しながら座標系(a)で操作する。試作したマウス型マスタの遠隔操作評価実験を地上で行った。4個の穴の連続ベグ挿入作業を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[14]。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ハンド位置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スライド、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。

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桁少ない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三次元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ソフトウエアガイド
- 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

などを作業に応じて表示した。Fig. 13 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て250[ms]とした。

4.3 遠隔教示機能

地上から遠隔操作や遠隔センシングを支援するため、ロボットの遠隔教示を実時間で実行する機能を設けた。ここでは筆者らのグラフィックシミュレータ介在型遠隔操作法[15]の考えをベースとし、そのローカルサイトでの力帰還機能を割愛する一方、運用の安全性と精密作業性を改善するため、実画像ベースの教示と遠隔センシングによるモデル較正機能を新規に取り入れてインプリメントした。

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、三次元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三次元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

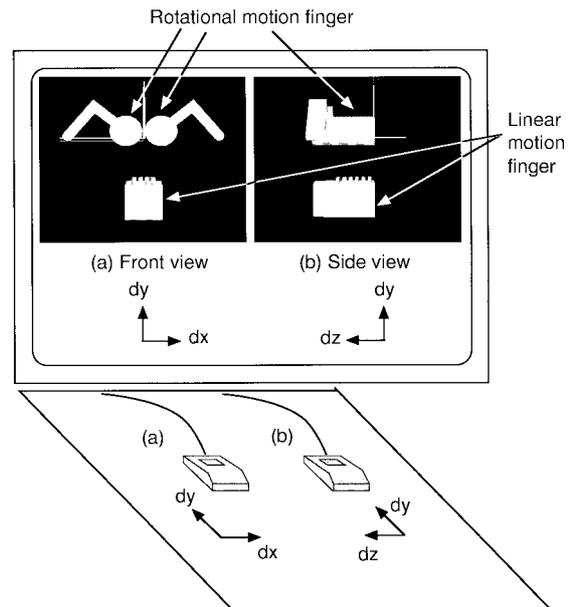


Fig.12 Operation using mouse-type master device



Fig. 13 Example of CG display (Solid model:predictive display, Wireframe: Virtual camera, Upper right; Multisensor bargraph)

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再生して送信する。この軌道計画、プレビュー、再生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。

5. 宇宙における遠隔精密作業

5.1 宇宙実験システム

ETS-VIIは1997年11月に打ち上げられ、宇宙実験は4ヶ月の軌道上待機を経て1998年3月から行われた。ロボットシステムは高度550[km]、傾斜角35度の円軌道を約96分で周回する親衛星「ひこぼし」の地球指向面に搭載されている。Fig. 14に軌道

上のロボットの映像を示す。小型アームに多重センサハンドが結合されており、タスクボードの様々な精密部品に対し作業する。紙面奥が飛翔方向で、地球は上方にあり照明源になっている。6.2節以外はこのコンフィギュレーションで実験を行っている。Fig. 15 (a)はロボットのハンドアイで撮像したタスクボードのパノラマ合成写真である。(b)は子衛星「おりひめ」に取り付けられたタスクパネルである。「おりひめ」への作業は、ハンドを小型アームから取り外し、NASAの大型アームに取り付けて実施している。

宇宙実験システムの全体図を Fig. 16 に示す。網掛け部分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

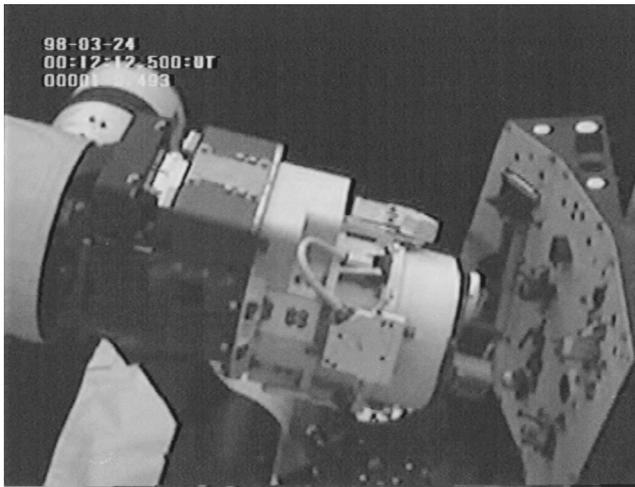
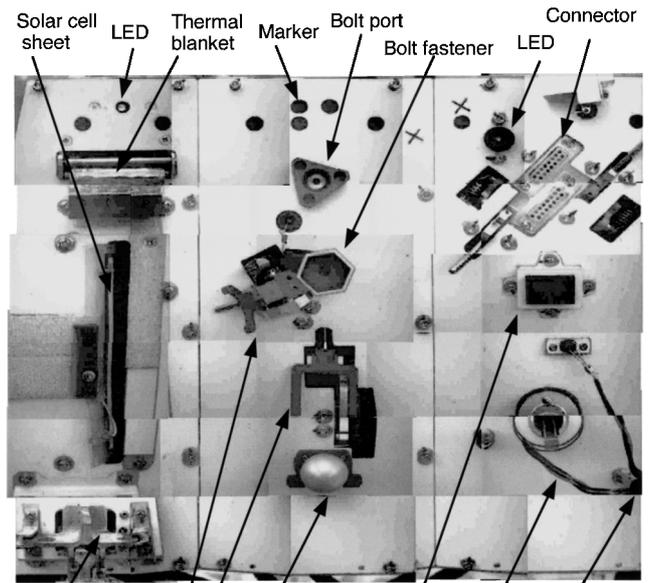
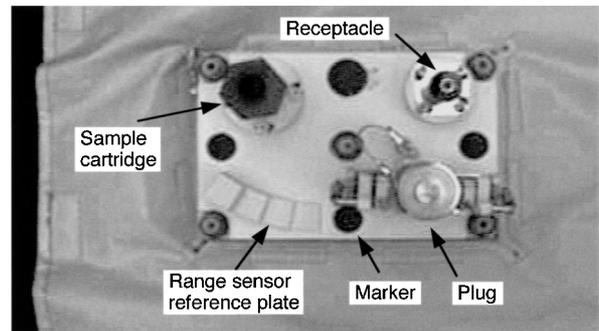


Fig. 14 View of robot in space



(a) Panoramic view of task board on Hikoboshi



(b) Task panel on Orihime

Fig. 15 View of task board and task panel in space

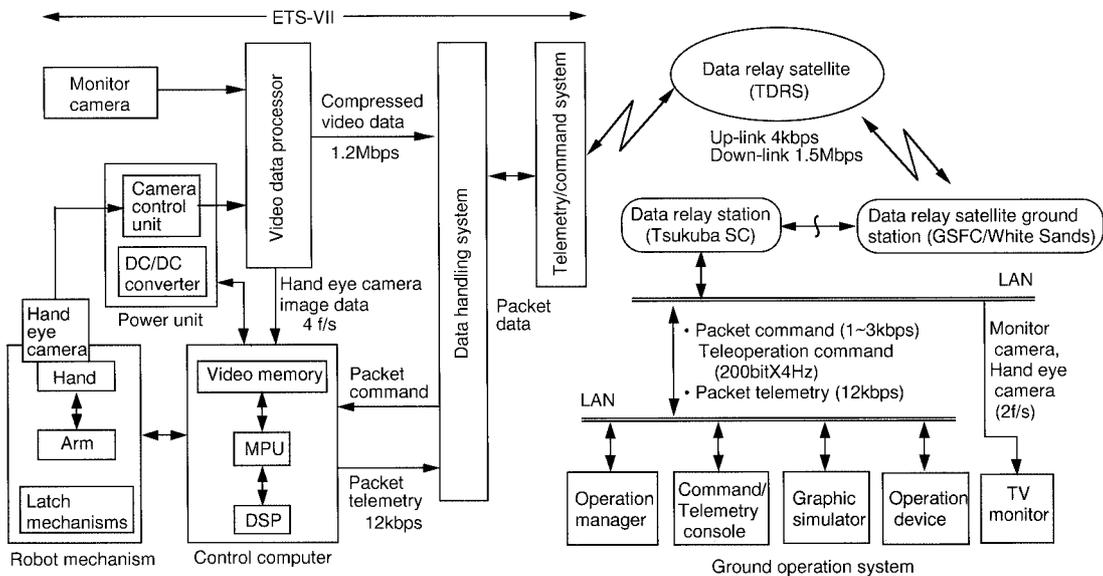


Fig. 16 Control signal flow of whole telerobotic system in space experiment

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4 [kbps]である。下り回線は1.5 [Mbps]で、そのうち約1.2 [Mbps]をビデオに、12[kbps]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ハンド近傍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、いずれも通信容量の制限からモノクロ画像をJPEG圧縮し毎秒2フレームで送っている。ハンドアイカメラの画像は搭載制御計算機で処理し自律制御にも用いる。1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。1周当たりのロボットの運用時間は、TDRSとETS-VIIの通信時間42分のうち、20分が割り当てられている。以下にセンサ融合テレロボティクスによる精密作業の結果を述べる。

5.2 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を例に述べる。打上固定機構を指で解除し、ボルトを抜き取り、隣のポートにねじ込む作業である。作業対象はFig. 15(a)のタスクボード中央に見える。この作業は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で適当なレファレンスタスクと考えられる。

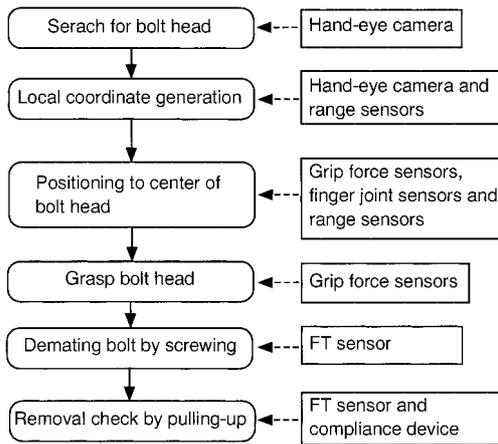


Fig. 17 Operation flow and multisensory utilization for bolt fastener demating

Table 2 Results of local coordinate generation using range sensors and image sensor

Condition	Coordinate element			
	x (mm)	z (mm)	α (deg)	β (deg)
Albedo illumination (Space: in daytime)	389.78	434.42	17.10	104.73
LED illumination (Space: at night)	389.82	434.37	17.10	104.71
Fluorescent lamp (Ground test)	389.25	435.33	17.10	104.57

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. 17 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3点以上の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、3.3節で述べたように、手首周りの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、次に作業面上の単位座標マーク (Fig. 15 参照) 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8 [mm]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 2 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試験と比較して示す。座標生成の精度は日照、日陰とも位置 ± 1 [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。一年間にわたる軌道上での座標生成の再現精度は0.2 [mm]、0.04度以下であった。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。

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三つの距離センサの距離情報を用いて合わせ、水平方向は指の接触センシングで合わせる。Fig. 18 に中心合わせ時の3指A, B, Cの位置(La, θ_b , θ_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(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

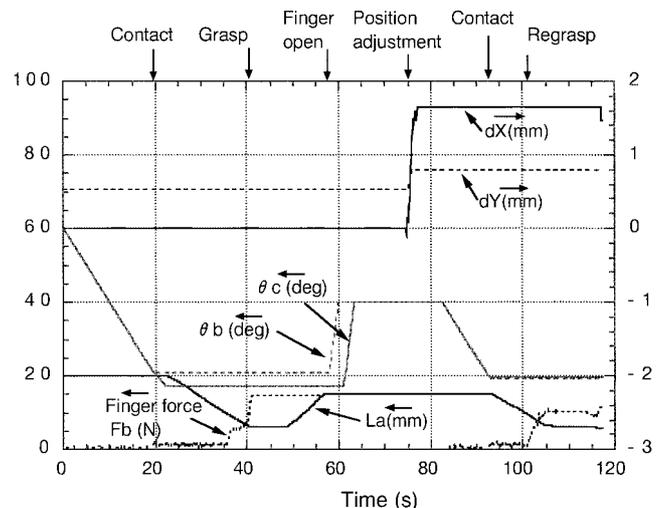


Fig. 18 Fine position adjustment by finger contact sensing

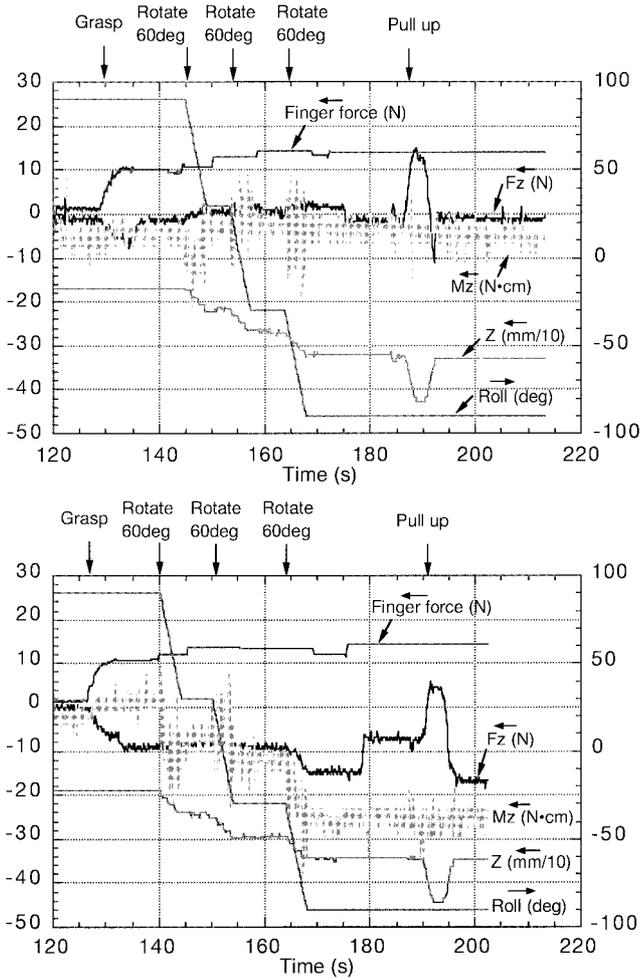


Fig. 19 Multisensory control in bolt unscrewing (Top: Space, Bottom: Ground)

偏差に応じた量だけアームの水平方向位置を調整する。再把持後、アンバランスが解消され中心合わせが完了しているのが分かる。この方式による把持の中心調整誤差は1 [mm]以下であり、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. 19 の上のグラフに示す。ここではz方向の力 (F_z) とトルク (M_z) 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 F_z で判定している。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 M_z 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



Fig. 20 Operation scene of bolt mating (Top left: Hand-eye camera, Top right: Monitor camera, Bottom left: Virtual-hyper camera (CG), Bottom right: Operation interface)

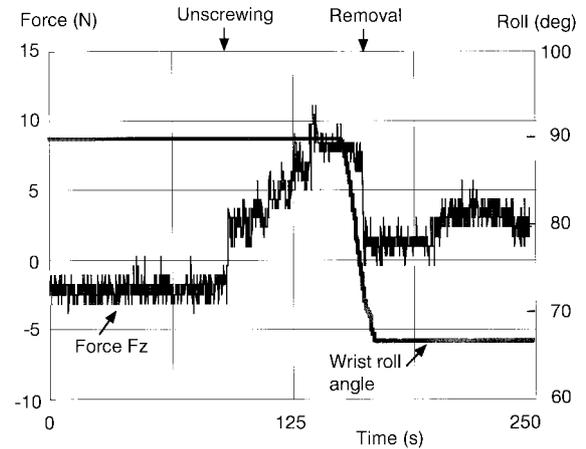


Fig. 21 Data of force and wrist angle in bolt removing

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分かる。

5.3 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. 20 に示す。ハンドアイカメラによる作業面像 (左上) はカメラ軸がハンド中心にな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 (右上) はボルトやポート先端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操作インターフェースの仮想ハイパーカメラ表示 (左下) を見ながら、操作装置を用い遠隔操作した (右下)。

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、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8[N])を印加したまま、ジョグダイヤルを回し手首ロール軸のみ遠隔指令を与えた。

ボルトを外す操作では、軸方向の引っ張り力を与え、ジョグダイヤルを反時計方向に回して手首ロール軸のみ遠隔指令を与えた。他の自由度はコンプライアンス制御で拘束した。Fig. 21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、外れたことが分かる。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。これは能動的な遠隔センシングの一例といえる。

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周必要なのに対し、遠隔・自律融合操作では約20分で完了し、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て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、デスクトップ型操作インター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。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、6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操作者から報告されている。

6. 宇宙における遠隔センシング

この章では3.3節に基づく遠隔センシング手法による宇宙での作業環境計測と、不確かさの多い作業および異常調査への適用例について述べる。

6.1 作業環境計測

正面像の取得は、前述したように距離センサによりハンドのカメラ軸を作業面に垂直制御して行う。垂直化の精度は0.3[deg]以下であった。日陰での撮像にはハンドに装着したLEDマイクロライトを用いる。軌道上では太陽光とLED光(照度約10[lx])の照度比は 10^4 以上あり、通常のCCDカメラの電子シャッタの調整範囲を超える。そこで、赤色LED光に対する狭帯域光学フィルタを用い、調整範囲に入るようにした。Fig. 22に日照と日陰での宇宙のD-Subコネクタの画像を示す。この工夫により、日照はもちろん、日陰でもわずか1[W]のLED光で実用上十分な視認性が得られた。Table 3はこの画像のピン穴配列からコネクタ

の位置・方向を計測した結果を示す。日照、日陰とも設計値との差はわずかで、画像計測は高精度で行われた。同一条件での繰り返し精度は0.01[mm]以下で、再現性も極めて良好であった。この画像計測は日陰では常に成功したが、日照ではピン穴の特徴抽出が不完全となり、不定となることが多かった。低軌道の日照下で、画素数の少ない画像や太陽の照射方向の影響を受けやすい光学特性を持つ物体の画像計測は、注意が必要である[16]。

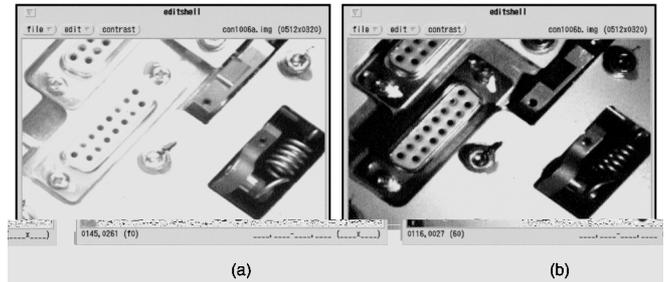


Fig. 22 Image of D-sub receptacle in space (a: Albedo illumination in satellite daytime, b: LED illumination in eclipse)

Table 3 Connector position measurement by onboard image processing in satellite daytime and night

Condition	Position (x, y) (mm)	Orientation (deg)
Albedo illumination (satellite daytime)	(49.67, 26.67)	-50.48
LED illumination (satellite night)	(49.89, 26.89)	-50.64
Design	(49.00, 26.00)	-50.00

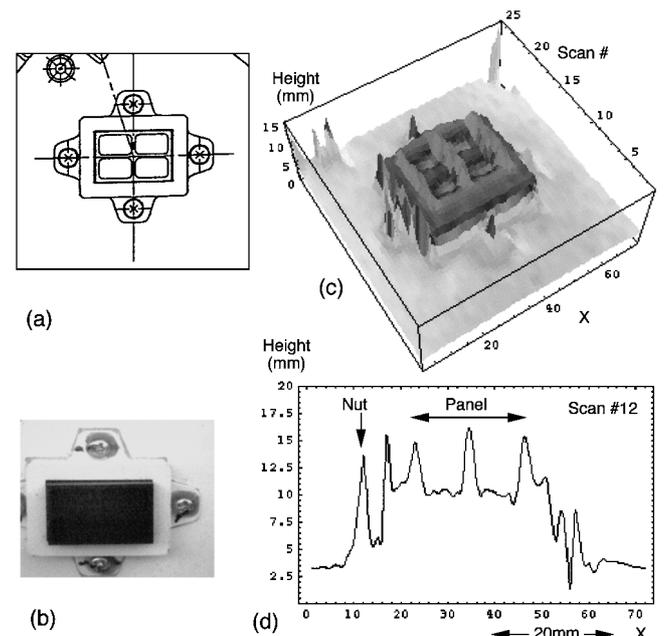


Fig. 23 Three-dimensional measurement by range sensor (a: Drawing, b: Camera image, c: Range density, d: Range profile)

側面図は距離センサを走査して得る。PSD 側にはレーザー光の波長のみを透過する光学フィルタを設け、宇宙の照度変動にロバストにしている。センサの距離精度は白色サーマルペイント (Astro-white) の物体に対し、日照、日陰とも 1 [mm] 以下であった。Fig. 23 は距離センサ走査による押しボタンスイッチの三次元形状測定結果である。目標物上空で手首ロール軸を定速回転して走査し、次に 2 [mm] 上方向に移動して逆回転して走査することを繰り返して測定した。走査方向 (x) は 1/8 [s] の周期でデータ取得しており、分解能は約 0.79 [mm] 相当となる。(a) は設計図面 (正面図)、(b) はハンドアイカメラによる正面画像である。(c) は距離測定値から高さを可視化したものである。この距離画像では、カメラ画像では同色のため認識できないスイッチ内の「田」の字型の溝が表れている。(d) は走査線 (#12) での疑似断面である。センサの原理から段差部や、金属面の止めネジの距離は不正確になるが、凹凸が良く表現されている。この方法でアームの現在位置からの対象物の相対的な幾何配置、形状が推定できる。距離センサは物体の表面光学特性の影響を受けやすいので、他のセンサと融合し互いの欠点を補う必要がある。しかし、日照・日陰にかかわらず使えるので、作業の様々な局面で非接触に作業環境計測する手段として有用であった。

宇宙実験の過程で、日陰期間ではハンドライトにより得られる影画像と距離センサ情報を用いて作業環境計測に応用できること

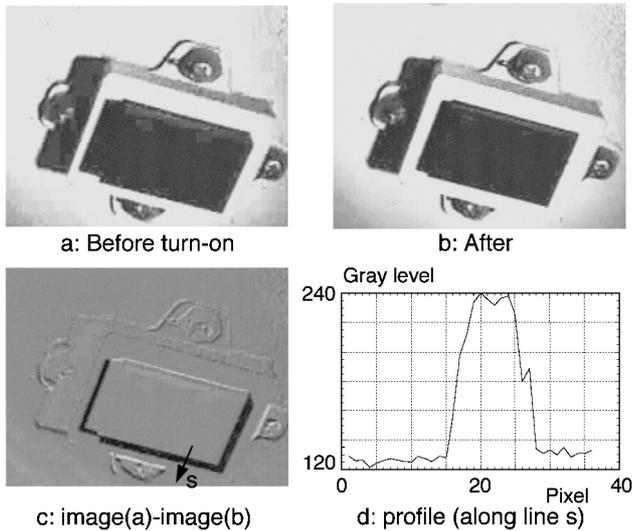


Fig. 24 Geometrical difference extraction by making shadow

が分かった。Fig. 24 は押しボタンスイッチの投入作業の前後のハンドアイ画像を示す (a,b)。LED 光は右上から照射されている。スイッチも影も黒いため目視でははっきりしないが、両画像の差をとるとスイッチ面の下降による変化分が明瞭に表れている。図 c で左と下の辺が影、右の辺が実像による変化分である。スイッチ下降量 1.2 [mm] に対し、下の辺では約 10 [pixel] の影の変化となっており (d)、計測に使える分解能を与えている。パネル面に対するハンドライトの高さと方向は距離センサに基づき指令できるため、この単純な原理を用い物体の微小な変化の能動センシングに応用できることが示唆された。一方、日照期間では太陽の照射方向・照度が変動するため影の抽出・利用は困難であった。

6.2 不確かさの多い作業への適用

不確かさの多い軌道上精密作業では、作業実施に先立つ作業環境計測のほか、作業実行の過程で遠隔センシングが必要となる。そのような適用例として、大型アームによるドッキングした衛星からの精密部品の回収について述べる。これは NASDA のアームに多重センサハンドを結合し、「おりひめ」を材料実験衛星に見立て、その固定セルから試料を取り出し、「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。この作業は地上試験ができず宇宙で初めて試みることで、アームの全長が約 2.4 [m] と長い精密作業に必要な先端位置決め精度が保障されていないこと、モニタカメラの視野外となり作業中は対象物を視認できないことなどから様々な不確か要素を含み、遠隔センシングが重要な役割を果たした。

「おりひめ」上の試料は Fig. 15 (b) に示している。試料と固定セルの構造を Fig. 25 に示す。セルの穴には 3 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。図は分離状態を示しているが、打上時には試料はラッチ溝部でセルのピンと底面からのスプリング圧で拘束されている。試料を取り出すには、セル内のピンが試料側面の鉤状溝に沿うよ

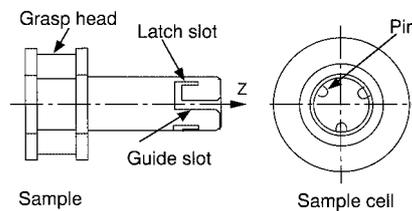


Fig. 25 Configuration and lock mechanism of sample cartridge

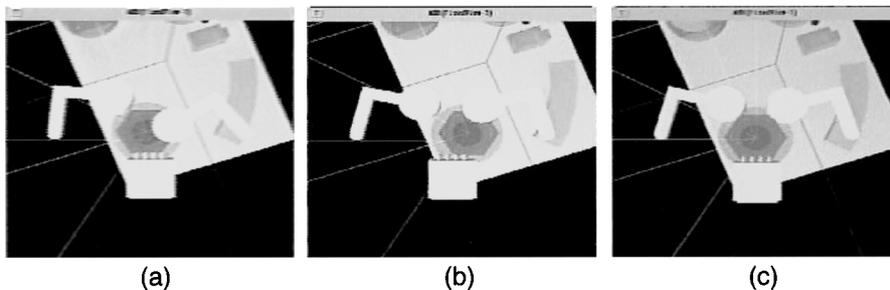


Fig. 26 Remote measurement of sample position by grasp-sensing from the ground (a: Initial grasping, b: 2nd grasp-sensing, c: 3-rd grasping after calibration)

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てロックする。「ひこぼし」の回収ポートは円筒になっており、試料は底面のベルクロ(マジックテープの一種)に押しつけて留める。

まず、衛星上の試料の位置が不確かなので指の接触センシングで同定する。その際、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、Fig. 26に示すようにCGで仮想カメラ表示する。最初、3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た(図a)。これは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を意味する。そこで、指の幾何学的な位置関係から式(8)、(9)を用い試料中心を推定し、ハンドを誤差分だけ相対移動させ再把持した(図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9[mm]の位置補正を行い、実世界、搭載制御系、地上運用シミュレータの整合をとることができた(図c)。

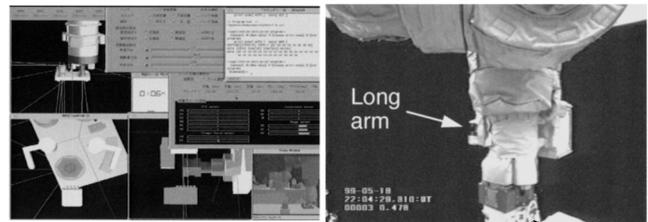
試料の突起の高さは、上空で手首ロール軸を順・逆方向に回転して距離センサを走査し、測定した。三角測量方式に起因するエッジ付近の不定データなどを排除して得た包絡プロファイルを図27に示す。距離センサは高さ方向以外は精度が悪いため、平面形状は手先カメラの正面画像、試料位置は上述の指による接触センシングデータを融合し、試料の位置、外形情報を1.5[mm]以下の精度で同定できた。

上述の補正された幾何モデル情報をもとに試料に接近し把持する。その際、大型アームの相対位置決め精度は各軸とも2.5[mm]であるが、ハンド中心軸および握り深さ(軸方向位置)を1[mm]程度まで合わせる必要がある。そこで、指の接触センシングにより中心位置の微調整を行った。また、距離センサを用いてハンド軸方向の把持位置を調整した。これは試料のスリップを防ぐため、指の行列ピンを試料の捕捉部位にかみ合わせするために必要な調整である。これらの予備把持によるセンシングと位置調整後、試料を本把持し、押し込みながら、60度反時計方向に回し、その後、力追従制御で引き上げ、試料の取り出しを完了した。固

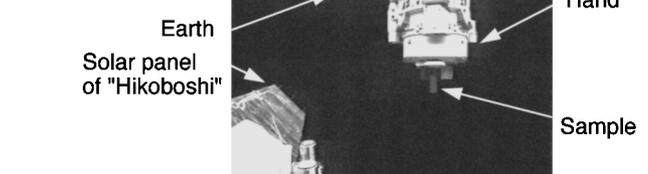
定セルから取り出した試料を「ひこぼし」に運搬し、回収ポートのベルクロに押し付けて付着させた。これらの作業の様子をFig. 28に示す。試料の取り出し時と収納時は、ポートやセルがカメラから見えないため、地上でテレメトリデータから再構成したCGによる仮想カメラ画像と多重センサのグラフ表示(a, c左図)を見ながら遠隔センシングを行い、作業状況を総合的に判断し、サブタスクごとのGo/NoGoを指令した。これらの表示は作業遂行に不可欠であった。

次に試料を「おりひめ」に運搬して固定セルに再収納する。Fig. 29に収納時のセンサデータを示す。まず、位置決め後、軸方向

(a) Grasp the sample on "Orihime"



(b) Transport



(c) Store to "Hikoboshi"



Fig. 28 Operation scene in sample retrieval from "Orihime" to "Hikoboshi" (virtual camera and real monitor camera)

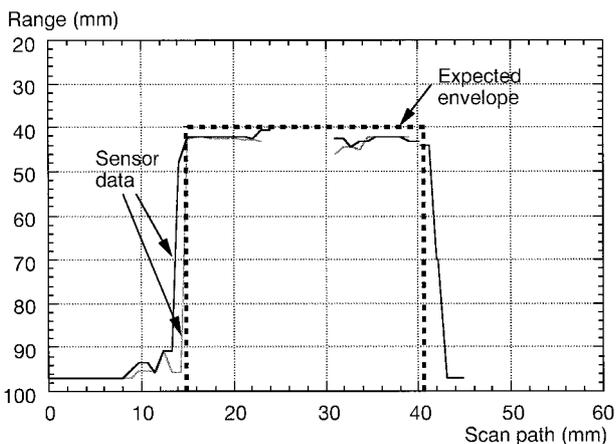


Fig. 27 Envelope of sample cartridge estimated by range sensor

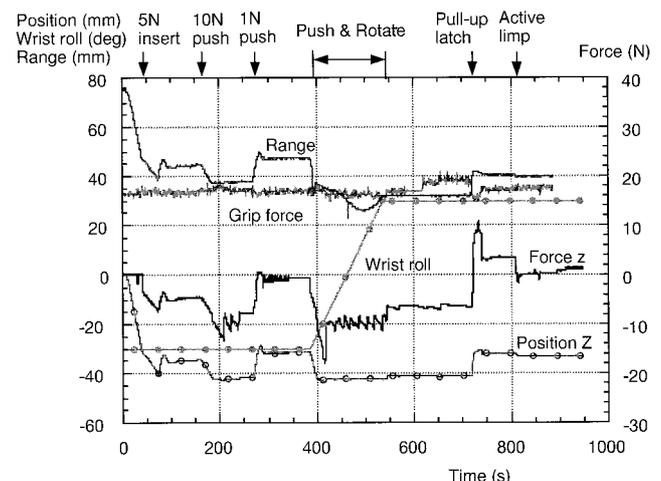


Fig. 29 Telemetry data in sample restore

に5 [N], 10 [N]の二段階の力追従制御で試料を仮挿入し, 次に, 目標値を1[N]にして力を緩和し, パネ力で試料が戻る距離を距離センサで測定した. これは試料の案内溝とセル内のピンの位相が合い, 引っかかりな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知るための遠隔センシングである. 次いで, 押し込み力10 [N]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, 5 [N]で引っ張り, 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, 能動リンク制御で力を解放し, 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.

このように遠隔センシングは作業に先立つ作業環境計測や作業後の調査に用いるほか, 作業と並行して実施する. センサ融合テレロボティクスではこれらのプロセスはFig. 30に示すように部分的に融合しながら連結する. 多重センサハンドによる遠隔センシングは, 計測と作用するデバイスが統合されているので, 試料の計測・モデル更新と把持の微調整・取り外しの例に見られるように, 作業環境計測と作業実行を取得データと作業の両面から円滑に接続させる. また, 試料の仮挿入でのスキルデータの取得のように, 作業の実行過程でしか知ることができない作業情報を実行と並行してセンシングし, 引き続き作業に活用させる. このように, 多重センサハンドを用いたセンサ融合テレロボティクスでは, 作業環境計測, 作業実行, 作業検査のプロセスの融合的な連結と, 作業実行の中でのセンシングと実行の融合を容易にし, 不確かさの多い状況でも通常のハンドより精密かつ高度な作業を可能とさせる.

6.3 遠隔指示 / センシングの異常調査への適用

想定外の状況での遠隔センシングは 地上の操作者とインタラクティブに行う必要がある. ここでは遠隔指示による遠隔センシングの実施例として, 実際に遭遇した球状部品の異常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. 15 (a)タスクボードの中央下部参照), 把持の際に保持剛性の異常が指の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と保持状態を調べた.

操作はデスクトップ型操作インターフェースの遠隔指示機能を用いて行った. Fig. 31にこのときのCG画像を示す. まず, CGモデルとハンドアイ画像を重畳表示させキャリブレーションを行った(a). 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上のハンドをマウスでドラッグして指示し, 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. 次に球を把持し, 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(b). 図bで, ハンド中心に設けた仮想円筒と球状部品には座標軸が描かれており, 右上のバーグラフには指と手首の反力が表示されている. 仮想円筒はロボット幾何モデルと連結しており, 操作者はこれをマウスでドラッグして移動量を指示し, 反力表示を見ながら保持剛性を調査する.

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, 把持時の保持剛性から球面座に凝着してい

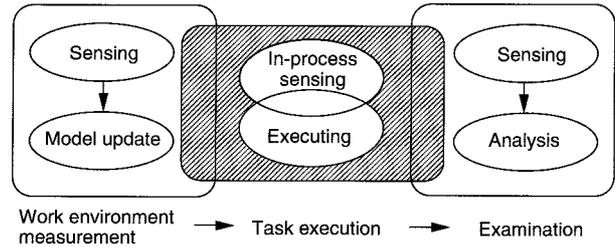


Fig. 30 Tele-sensing in sensor-fused telerobotics

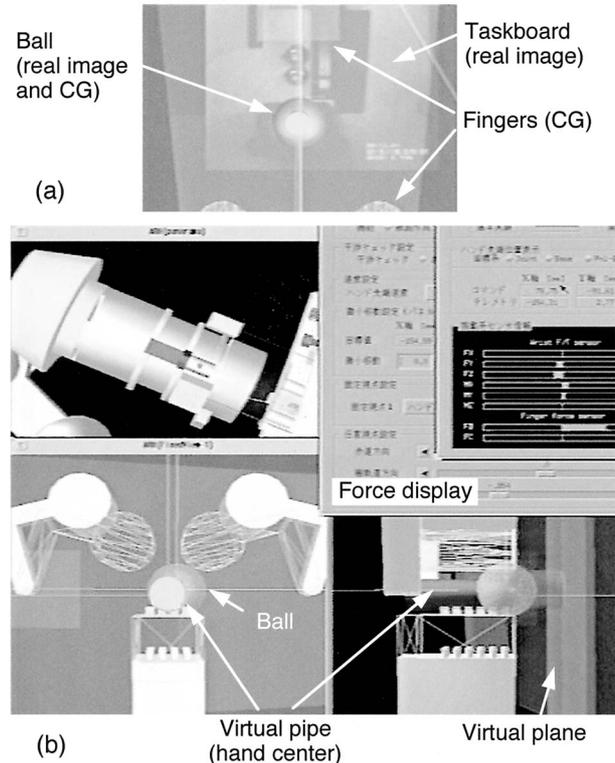


Fig. 31 CG based remote teaching/telesensing (a: Superimposed display of CG and real video image, b: Position teaching for contact force sensing)

ることが判明した. 凝着の原因は打上時の振動か, 宇宙での真空環境によるコールドウエルドと推定している. これは「その場」遠隔指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に柔軟に対応できたことを示す一例である. なお, 凝着はその後計画したロボット作業で解放できた.

本運用において遠隔指示性は良好であった. マウスのドラッグによる指示, 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遠隔センシングによる異常調査に効果的であった.

7. 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実施し, 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WEB [17]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概念を示した。

2) 上記を実現するキーコンポーネントとして、新しい3指機構と多重センサを特徴とするハンドを開発し、それを用いて精密位置・力補償および遠隔センシングを行う戦略を示した。

3) 遠隔精密作業に適した、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」遠隔教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・自律融合操作が軌道上の精密作業に有効であることを示した。

5) 多重センサハンドを用いた遠隔センシングは、軌道上での作業環境の精密計測、および、不確かさの多い作業に有効なことを示した。また、遠隔教示と組み合わせることで異常状態の調査に効果的なことを示した。

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寄与することを期待している。

謝辞 本宇宙実験の実施にあたり御協力頂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] D.E. Anderson, T.O. Moore and D.G. James: "Hardware Design for Joint EVA and Telerobotic Compatibility," SAE Technical Paper Series, 93-2222, 1993.
- [2] M. Oda, T. Inagaki, S. Nishida, M. Hayashi and T. Sugano: "Components and Control System of ETS-VII Robot Experiment Subsystem," Proc. of 9th ICAR, pp.255-260, 1999.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 佐藤, 松井, 平井: "人間との共同作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.5, pp.602-613, 1991.
- [8] 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.
- [9] T.B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control. pp.13-96, MIT Press, 1992.
- [10] 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.
- [11] 町田, 戸田, 森谷, 津田, 秋田: "センサ融合テレロボティクスの宇宙における精密作業実験", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.444-452, 2000.
- [12] J. Salisbury: "Design and Control of an Articulated hands," Proc. of the International Symposium on Design and Synthesis, Tokyo, 1984.
- [13] S. Jacobson: "The UTAH/MIT Dexterous Hand: Work in Progress," Int. J. Robotics Research, 1984.
- [14] 津田, 村瀬, 町田, 秋田: "宇宙用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, pp.401-402, 1995.
- [15] K. Machida, Y. Toda and T. Iwata: "Development of Graphic Simulator Augmented Teleoperation System for Space Applications," AIAA GNC Conf. pp.358-364, 1988.
- [16] 町田, 戸田, 村瀬: "「ひこぼし」搭載多重センサロボットハンドの宇宙における性能", 計測自動制御学会論文集, vol.35, no.12, pp.1583-1590, 1999.
- [17] "高機能ロボットハンドの宇宙実験", <http://www.etl.go.jp/~5822/ARH/>



町田和雄 (Kazuo Machida)

1945年8月31日生。1970年、北海道大学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、宇宙ロボティクスの研究に従事。現在、宇宙保全システムラボのリーダー。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）



戸田義継 (Yoshitsugu Toda)

1950年9月13日生。1975年、名古屋大学航空工学専攻修士課程修了。同年、電子技術総合研究所へ入所。極限技術部主任研究官。イオンエンジン、宇宙ロボットの研究に従事。日本航空宇宙学会、AIAAなどの会員。（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。ITS事業推進本部担当部長。



駒田 聡 (Satoru Komada)

1955年3月21日生。1978年東京大学工学部精密機械工学科卒。同年、(株)富士通研究所入社。プリンタ、ファクシミリなど入出力装置の研究開発に従事。1985年より宇宙分野に転じ、宇宙実験機器や宇宙ロボットなど衛星搭載機器の開発を担当。

(日本ロボット学会正会員)