解説

高機能ロボットハンドシステムの宇宙実験

Space Experiment of Advanced Robotic Hand System

町田 和雄* *電子技術総合研究所

Kazuo Machida* *Electrotechnical Laboratory

ETS-VII には二種類のロボットが搭載されている。NASDA が開発した比較的大型のロボットアームと、通産省が開発した高機能ハンドシステム (ARH: Advanced Robotic Hand System) と呼ばれる、3 指多重センサハンドを中心とした小型の精密作業ロボットである。ここでは後者の宇宙実験結果の概要を紹介する。

1. 高機能ハンドシステムとは

1.1 その特徴

ARH 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 [1] で、宇宙飛行士の手作業相当の軌道上サービスを行うロボットの基礎技術修得を目指したものである。同種のロボット実験には、DLR が 1993 年にスペースシャトルで行った ROTEX がある [2]。これが 1 自由度グリップ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、ARH は過酷な宇宙船外での作業、3 指・3 自由度ハンドによる精密作業、1 年半の長期使用、異種ロボットへのハンド結合による汎用利用、などを主な違いとしている。ARH は宇宙環境に出た、手作業相当の精密作業を行える世界最初のロボットである。図 1 に搭載した 3 指多重センサハンドを示す。

ARH のシステム構成上の主な特徴は次の 3 点である。

i) 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 本の回転指からなる 3 指モジュールと、柔軟な手首として機能するコンプライアンスデバイスで実現 [3]

ii) 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・トルクセンサを融合あるいは階層的に利用

iii) センサ融合テレロボティクスによる地上からの精密作業支援

図 1 3 指多重センサハンド

1.2 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に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において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サブ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。

これらに対応するため、ARH では図 2 に示すように、多重センサハンドの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による制御とハンドの精密調整機構に対応する。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により対応する。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可視化表示することにより対応する。こ

原稿受付 1999 年 8 月 3 日

キーワード: Space Robot, Multisensory Hand, Telerobotics, Sensor Fusion

*〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4

*Tsukuba-shi, Ibaraki

図2 センサ融合テレロボティクスの構造

図3 宇宙実験の概念

のアプローチは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名付けている[4]。

2. 宇宙実験

ARHの宇宙実験は、1998年3月末から行われた。実験運用概念を図3に示す。ロボット本体は高度550[km]、軌道傾斜角35度の円軌道を1周約96分で周回するETS-VIIの地球指向面に搭載されている。コマンドは筑波宇宙センターのARH運用装置から、パケット化されデータ中継衛星(TDRS)の運用を行うNASAのGoddard宇宙飛行センターに有線で送られ、さらにWhite Sandsの地上局に送られる。ここから静止軌道のTDRSに電波で送信され、衛星間通信でETS-VII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

間的に巨大なテレロボット制御ループを形成している。一巡の通信遅延時間は5~6秒である。運用は、ロボットの監視、スーパーバイズ、遠隔操作を行うオペレータと、その指示を受けコマンド/テレメトリの送受信を担当するコマンドの2名を最小要員として実施される。オペレータは、宇宙から送られてくるテレビカメラ画像(監視カメラおよびハンドアイカメラの2ch)と地上のシミュレータのCG画像を見て運用する。

実証タスクは軌道上保守で必要となる作業を分析し、精密さを要求される代表的作業要素を抽出して計画した。以下に主な結果を紹介する。

2.1 多重センサベース制御による精密作業

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要素として、電気コネクタの着脱がある。ここでは宇宙機器に多用されているD-Subコネクタを対象として着脱作業を行った。このコネクタは、多ピンであることとレセプタクルのガイドが狭いことから、把持したプラグの位置・姿勢をレセプタクルにサブミリの精度で合わせて挿入する必要がある。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た。このタスクは、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モードで運用した。

次に、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タスクと考

図4 地上からの遠隔操作による宇宙のワイヤの配線

えられた。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。操作デバイスにはアームや指の動きを統合的に操作でき、かつCGでの指令に適したマウス型マスタを開発して用いた。

2.2 地上から宇宙のワイヤを配線する

地上から遠隔操作する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、ベ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、CG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[5]。遠隔操作の様子と、ワイヤ掛け替え前後の写真を図4に示す。

2.3 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[6]。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である。太陽電池の展開により、LEDが発光することがハンドア

図5 太陽電池シートの展開と発電

イカメラで確かめられた（図5）。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、位置計測を行い、把持と収納動作を行った。これは多重センサハンドを利用した作業環境計測の一例である。

2.4 「おりひめ」への軌道上サービス

これはNASDAの大型アーム（2.4[m]）に高機能ハンドを取り付け、「ひこぼし」から「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領域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。

まず、大型アーム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、電気的結合を行った。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、収納を行った。また、電気コネクタの着脱を行った。図6に大型アームに結合されたハンドと、「おりひめ」上の作業部品の画像を示す。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。ここでは、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精密位置計測と、アームの力覚制御により誤差補償を行い、円滑に作業を実行できた。

このほかに、遠隔指示、作業環境計測など様々な実験を実施してきた。実験結果はWEB[7]にムービーを含め公開している。

3. Lessons learned

これまでの宇宙実験で様々な知見や教訓を得ている。これらの多くは予想の範囲であるが、実作業を行うロボット

図6 「おりひめ」への軌道上サービス（左上：手先カメラから見た「おりひめ」上の部品，右上：大型アームに結合された高機能ハンド，左下：シミュレータ CG，右下：操作卓）

にとって実体験は貴重なものといえる。誌面の都合上，詳細は割愛するが，以下に要点をまとめる。

- (1) 無重力：重力がないため，力センサベースのロボット制御にとって都合の良い場であった。一方，地上試験で得た作業技能やデータベースの重力に関する部分が適用できないこと，把持解放時の対象物の挙動を常に考えた制御戦略が必要であることなど，知らされる点も多い。
- (2) 真空：打上時の振動や長期の熱真空環境への暴露で，着脱要素に対する必要力が大きく変わっている場合が多く，自律制御のデータベースに注意が必要である。
- (3) 視覚環境：太陽位置が地上より15倍ほど速く変わることで，照度変動幅が大きいこと，周囲からの反射光や陰が生ずることなどから，地上の屋外より条件は悪い。画像処理に基づく制御には十分な注意が必要である。宇宙での視覚認識は研究すべき課題が多い。一方，日陰は適切な照明を用い，良好な視覚環境を与える時間帯として利用できる。
- (4) 衛星間通信：通信は安定し，ロボット運用に支障はなかった。通信遅延や通信容量の問題は，今回のタスクに関してはセンサ融合テレロボティクスにより克服されたといえる。運用上の最大の難点は，衛星間可視の条件からくる運用時間制限（約20分）であった。サブタスクをこの時間で完結させること，予想外の状況に陥っても時間内に速やかに安全モードに移行しうるように運用手順を整え，訓練することは，かなりのロードである。
- (5) 無人：予想外のことが起きたときの状況の把握や，ロボットが対応できることは限られたものとなる。ロ

ボットは無人環境でこそ存在意義を最大とするが，人間がいなかったことに対応するため克服すべき課題は少ない。

4. む す び

「高機能ハンド」と名付けたのは，抽象名とすることにより開発の自由度を留保したいのと，当時の技術で宇宙用として実現可能な高機能さを追求したい意図からであった。概念検討から10年近くたった今，宇宙で働いているロボットには，すでに熟した技術と新鮮さの両面を感じている。

ETS-VIIの宇宙実験により，我が国としては2[m]級遠隔ロボットアームと小型精密ロボットの技術修得がなされたことになり，世界における宇宙ロボットの最先進国に到達したといえる。ロボット向きに構造化された作業対象への軌道上サービスは精密作業を含め技術準備はおおむね整ったといえる。今後は，その活躍の舞台作りが，なよりの課題となろう。

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開発と，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。御尽力いただいた，USEF，富士通（システム），川崎重工業（太陽電池セル展開実験），東芝（ワイヤ操作実験），USEF 技術委員会および NASDA の関係者に感謝します。

参 考 文 献

- [1] 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。
- [2] 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.
- [3] 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。
- [4] K. Machida et.al.: "Advanced Robotic Hand System: Sensor-Fused Telerobotic Experiment on ETS-VII," ICAR'99, 1999.
- [5] N. Matsuhira and et.al.: "Wire Handling Experiment by Teleoperation from the Ground," i-SAIRAS'99, 1999.
- [6] N. Kubota and et.al.: "Flexible Solar Cell Sheet Handling by a Three-finger Multisensory Hand," ICAR'99, 1999.
- [7] <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，宇宙保全システムラボなどのリーダー，工学博士，計測自動制御学会，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）