解説

ETS-VII 搭載ロボット 遠隔操作実験と有人宇宙ロボティクス

Teleoperation on Onboard Robot Arm on ETS-VII and Robotics for Manned Space System

若 田 光 一* *宇宙開発事業団有人宇宙活動推進室

Koichi Wakata* *National Space Development Agency of Japan

1. は じ め に

現時点で実用化されている唯一の宇宙ロボットであるスペースシャトルの Remote Manipulator System (SRMS) と ETS-VII 搭載ロボットアームについて、その機能、操作性、運用性等について比較評価を行い、ETS-VII 後期利用段階の実験、および今後の宇宙ロボットの研究開発に反映させることなどを目的として 1999 年 3 月に実施された ETS-VII 搭載ロボットの遠隔操作実験に参加した。ここでは、ETS-VII 搭載ロボットと SRMS および国際宇宙ステーション (International Space Station, 以下「ISS」) のロボットの運用を比較した観点から本実験の報告を行うと共に、各有人宇宙ロボティクスについて簡単に紹介する。

2. スペースシャトルおよび ISS における有人宇宙ロボティクス (表 1 を参照)

ISS (図 1) の組立、保守整備、実験ペイロード交換作業等において、ロボティクスは極めて重要な役割を果たすことになる。ISS には日本の Japanese Experiment Module Remote Manipulating System (JEMRMS, 図 2) の親アーム (Main Arm, MA) と子アーム (Small Fine Arm, SFA), カナダの Space Station Remote Manipulator System (SSRMS) と Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM), およびヨーロッパの European Robotic Arm (ERA) 等のロボットが搭載される予定である。一方、SRMS (図 3) は 17 年以上の運用実績を持ち、軌道上での衛星の放出や回収、船外活動の支援、スペースシャトルオービタ外観検査等に使われてきている。筆者は 1996 年 1 月の STS-72 ミッションにおいて日本の宇宙実験観測フリーフライヤ (SFU) の回収および NASA の実験衛星 OAST FLYER (SPARTAN 衛星) の軌道上への放出と回収、さらに船外活動の支援で SRMS を操作する機会を得たが、人間機械系インターフェイスを含む操作性等の点に

においても SRMS は完成度の高い有人宇宙ロボティクスであると言える。

環境・熱制御、電力供給、通信、姿勢制御等の ISS 搭載各有人宇宙システムに比べ、ロボティクスは運用に関して特殊な操縦技術や知識がオペレータに要求されるシステムと言える。ISS 搭乗員に要求される訓練項目は多岐にわたるため、ISS 搭載ロボティクスの基本的な運用形態および人間機械系インターフェイスの共通化は、安全かつ効率的なシステム運用および訓練期間の短縮化等の観点から極めて重要である。ISS ロボティクスに関して、「共通化」が検討されてきている項目として、ワークステーションのデザインとシステム運用が挙げられる。前者は、コンピュータ・

図 1 国際宇宙ステーション

図 2 日本の宇宙実験モジュール「きぼう」と JEMRMS

原稿受付 1999 年 7 月 30 日

キーワード: ETS-VII, Space Robot, Space Station, Space Shuttle, JEM

*〒 305-8505 つくば市千現 2-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

表1 ETS-VII 搭載ロボットと有人宇宙ロボティクスの比較

	ETS-VII 搭載ロボット	JEMRMS 親アーム	子アーム	MSS SSRMS	SPDM	ERA	SRMS
主要機能	技術試験	ペイロード交換等	ペイロード交換、ORU保守整備等	ISS組立、保守整備、船外活動支援等	ISS保守整備、ペイロード交換等	ISSロシア・セグメント保守整備、船外活動支援等	衛星放出回収、ペイロード操作、船外活動支援等
アーム操作	地上のロボット実験運用設備（並進および回転用操縦桿あり）	船内ワークステーション（並進および回転用操縦桿あり）		船内ワークステーション（並進および回転用操縦桿あり）		船内ワークステーション、船外ワークステーション（共に操縦桿なし）	船内ワークステーション（並進および回転用操縦桿あり）
アーム基部の移動	不可	不可	可（親アーム）	可	可	可	不可
関節数	6	6	6	7	15（各アーム7個とBodyに1個）	7	6
エンド・イフェクタ(EE)	ツール	スネア・ワイヤ	ツール	スネア・ワイヤとラッチ	ORU交換機構(OTCM)	ラッチとツール	スネア・ワイヤ
アーム取付カメラ	EE:1 肩部:1	EE:1 肘部:1	ツール:1	EE:2 ブーム:2	OTCM:2 Body:2 POA:1*	EE:2 ブーム:2	EE:1 肘部:1
グリップ・フィクスチャ	ツール・フィクスチャ	FRGF**, PDGF***	ツール・フィクスチャ	PDGF, FRGF	H-Handle	専用フィクスチャ	FRGF, PDGF, RSGF****, EFGF*****
アーム長	約2 m	約10 m	約2 m	約17 m	各アーム約3.5 m	約11.2 m	約15.2 m
最大ペイロード重量	430 kg	7000 kg	300 kg	116,000 kg	800 kg	8000 kg	254,545 kg
最大速度	0.05 m/s 以上 5.0 deg/s 以上	0.06 m/s 2.5 deg/s	0.05 m/s 7.5 deg/s	0.36 m/s 4.0 deg/s	0.075 m/s 2.5 deg/s	0.2 m/s 2.9 deg/s	0.6 m/s 4.7 deg/s
操作モード	マニュアル、自動、単軸等	マニュアル、自動、単軸等	マニュアル、自動、単軸等	マニュアル、自動、単軸等	マニュアル、自動、単軸等	自動、単軸、単自由度等	マニュアル、自動、単軸等

* POA: Payload ORU(Orbital Replacement Unit) Accommodation/Attachment
 ** FRGF: Flight Releasable Grapple Fixture
 *** PDGF: Power and Data Grapple Fixture
 **** RSGF: Rigidize Sensing Grapple Fixture
 ***** EFGF: Electrical Flight Grapple Fixture

図3 シャトル搭載マニピュレータ (SRMS)

ディスプレイや操縦桿の仕様、操縦パネルのレイアウト等の人間機械系インターフェイスの分野であり、後者は、運用手順、運用用語、使用する単位、作業内容に応じた運用座標系の選択等がその例である。

3. ETS-VII 遠隔操作実験

3.1 目的

1999年3月16日に参加したETS-VII搭載ロボット遠隔操作実験では以下の事項について評価を行った。実験に先立ち2日間にわたって遠隔操作実験の訓練を実施した。

- 訓練を通じて、ETS-VIIのロボットシステムが、短時間の訓練で使用できるように設計されていることを評価する。(訓練の容易さ)

- 実験、および実験時の実験システム（衛星バス、搭載ロボット実験系、通信ネットワーク、ロボット実験運用設備）の運用を通じて、ETS-VIIのロボットシステムが容易に運用できるシステムとして製作されていることを評価する。(運用の容易さ)
- 宇宙開発事業団(NASDA)、航空宇宙技術研究所(NAL)、通信総合研究所(CRL)のロボット実験運用設備からの遠隔操作実験を通じて、それぞれの実験運用設備の設計思想の妥当性を評価する。
- NASDAのロボット実験運用設備は、衛星/プラットフォーム/宇宙ステーション等の宇宙機に対する機器交換、点検、燃料補給等の作業の大半は、事前に作業内容が予測可能であるため、運用の容易さ、确实さを確保するため、作業の大半を電子手順書による自動操作により実行し、必要に応じて遠隔操作を併用している点。(作業の自動化/省力化)
- ハンドコントローラを使用した遠隔操作においてもCGの利用、予測情報の提示等により通信時間遅れによる操作性の低下をカバーしている点(通信時間遅れの克服)

3.2 実験内容と結果

3.2.1 タスクボード側面への操作実験

この実験では、NASDAの実験運用設備(図5)を使用し、ロボットアーム先端でETS-VIIのタスクボード表面(図6右上部にある側面)をなぞる作業(ロボットアーム先端の位置・姿勢の制御と同時に発生力を制御する実験)を実施した。

図4 ETS-VII搭載ロボット実験機器

図5 NASDA ロボット実験運用設備の操作卓

図6 タスクボード外観

予測シミュレーション

実験に先立ち、時間遅れを考慮した予測シミュレーション有りおよび無し状態で、遠隔操作習熟のためのアーム操作を実施したが、予測シミュレーション無しの操作では、アームの位置決めの際、約10[mm]程度のオーバーシュートが出た。

予測シミュレーション無しの操作での位置決め精度（操作者技量）は訓練により多少向上すると思われるが、約6秒の通信時間遅れの環境では、予測シミュレーションはアームの位置決め操作性に非常に大きな効果があると感じられた。

コンプライアンス・モード

コンプライアンス・モードでの倣い操作では、押さえつけ力を一定値に維持するために、アーム先端に取り付けら

図7 アームの位置・姿勢表示用CG (SRMS) の例

図8 力・トルク表示用CG (SSRMS/SPDM)

れたペグの通る軌跡を考慮しながらハンドコントローラ入力をする必要がある。実験での操作は力・トルク表示（テレメトリ）と環境モデル（予測シミュレーションCG／テレメトリCG）或いはテレビカメラ映像を用いて行ったが、手動制御時の押さえつけ力の目標値に設定した25 +/- 5[N]に維持することはかなり難しかった。また、実機でのこの操作はシミュレータによる訓練時より難しい印象を受けた。押さえつけ力により変化する摩擦力のシミュレーションにおける模擬精度が実機との操縦感覚の違いとして現れてくるものと思われる。

1997年8月のSTS-85における日本のManipulator Flight Demonstration (MFD) ミッションでの実験結果等からは、アームの位置・姿勢 (Point of Resolution, POR) と力・トルクの表示を同一の参照座標系において表示しない場合には、手動操縦を難しくすることが報告されている。本作業ではCOR (Center of Rotation, 制御座標系の中心) とコンプライアンス中心は一致していたが、一般に力・トルクと位置・姿勢の両方を手動制御する場合には、CORとコンプライアンス中心は一致させ、CORに一致するPORを用いて、位置・姿勢情報およびCORでの力・トルク値を表示する事が望ましい。(SRMSにはコンプライアンス機能はなく、同機能を有するロボティクスとしてNASAの宇宙飛行士がこれまでに軌道上で操作を行ったものは、MFDのみである。) なお、図7にSRMSでクルー支援ディスプレイとして使用されるアームの位置・姿勢 (POR) 表示用CG、および図8にSSRMS/SPDMで

使われる力・トルク表示用 CG の例を示す。

力追従モード

力追従モードでの扱い操作では、押しつけ力が極めて正確に制御され、コンプライアンス・モードでの押しつけ力の手動操作に比べ扱い操作は格段に容易であった。このモードは、SRMS や国際宇宙ステーションの有人宇宙ロボットのいずれにも存在しない機能である。

アーム先端のペグが扱い面と接触する前に力追従モードに移行すると、ハンドコントローラ入力のない状態で、力追従を設定した自由度方向への移動が生じるため、力追従によるアーム操作に慣れていない者から見ると、Uncommanded Motion のように一瞬感じられた。力追従モードへの移行は構造接触後に行う方がアーム動作モニタの観点からは自然であるように感じられた。(SRMS 運用では領域チェック等の機能がないたため、アーム動作時には、アームの Uncommanded Motion に対して、およびアーム運用時の構造接触を避けるため、オペレータの目視によるモニタを常に行うようになっている。)

人間機械系インターフェイス

操作卓にタッチパネルを採用しているが、マウスによる場合に比べコマンド入力を行いやすいという感じを受けた。(現在 SRMS の操作では、二つの操縦桿、ハードウェア・パネル上のスイッチ類、および計算機への入力のためのキーボードを使用しているが、そのうち、ハードウェアパネルの部分はタッチパネルに変更される予定である。この改修により、人間機械系インターフェイスの点で SRMS のシステム操作性およびモニタ性の向上が期待できる。)

操縦桿特性

手動操縦における速度指令の粗 (Coarse)・精 (Vernier) の切り替え、および速度指令ホールドのオン・オフ切り替えは、SRMS 等と同様に操縦桿上にスイッチがあることが望ましいと感じられた。前者は、手動操作により大きな POR 移動を行う場合等、初動は「精」で立ち上げ、「粗」で大部分の移動を行い、目標点に近づいた点で「精」に切り替えて微調整を行う一連の作業を操縦桿から手を離さずに行うことを可能にする。(ペイロードを把持している場合等には「粗」での立ち上げおよび停止を避けることによりアームの始動および停止時の揺れを少なくできる効果がある。) 後者は、必要な操縦桿入力を維持したまま速度指令ホールドをオンにすることを可能にするもので、速度指令ホールドする自由度が並進用操縦桿 (THC) および回転用操縦桿 (RHC) 両方へのコマンド入力を必要とする場合には不可欠である。

また、THC および RHC の Deadband の設定は図 9 の (A) のようになっていたが、位置・姿勢および力・トルクの制御共に細かなコマンド入力を可能にするために (B) のような Input/Output 特性を持つものであることが望ましい

図 9 操縦桿の入出力特性

図 10 トラス構造物の折り畳み収納 (収納前の状態)

ように感じられた。なお、SRMS や JEMRMS, SSRMS 等は (B) 型を採用している。

3.2.2 タスクボード表面の目視検査

タスクボード扱い面への扱い操作実験の後、ロボットアームに取り付けられたカメラを使用したタスクボード表面の目視検査を実施した。

肩ロール関節 (第 1 関節) と共に動くテレビカメラ (図 4 参照) は、常に作業部の大部分を視野内に映し出せる点で有効な視覚情報を提示していると感じた。なお、このようなカメラは SSRMS 等の宇宙ステーションロボティクスには見られないものである。

3.2.3 展開トラスの収納実験

この実験では、NAL のロボット実験運用設備を使用して、トラス構造物の折り畳み収納を行った (図 10 参照)。訓練におけるハードウェア・シミュレータ

当該タスクの訓練時にはハードウェアのモックアップを用いたシミュレーションを実施でき、遠隔操作のための訓練としてはオペレータへの視覚情報を含めフィデリティの高い理想的なシミュレーション環境が実現できており、実際の遠隔操作実験時の操作も訓練時とほとんど同じ感覚で実施することができた。したがって、実験時に要した作業時間も訓練時とほぼ同様であった。SRMS, JEMRMS の小アーム, SSRMS, および SPDM では CG によるシミュレータと共に、ハードウェアシミュレータを使用するが、構造接触を伴うアームの操作やテレビカメラ等の視覚システムの操作訓練等にはハードウェアシミュレータは有効な設備であると言える。

軌道接線方向ベクトルを用いた操作支援システム

遠隔操作の軌道接線方向、および軌道接線方向ベクトルと遠隔操作コマンドのズレを操作支援情報として表示するジョイスティック（JS）操作支援システムは、時間遅れを伴う遠隔操作による展開トラス収納のような作業においては、非常に有効な操作支援システムであるという印象を受けた。訓練、実験と、JS 操作支援システムに従って操作することにより、作業を繰り返し完了することができた。本システムの応用として、ペイロードのパーシングなどより多くの自由度制御が要求される作業での JS 操作支援システムが考えられる。

3.2.4 ロボットオペレータのテレメトリ監視の評価実験

この実験では、CRL のロボット実験運用設備からロボットの制御を行っているときに、オペレータが地上監視装置のどこをモニタしているかの評価を実施した。

音声による情報提示手法は自動制御のモニタ、遠隔操作におけるオペレータの負荷低減に有効なシステムであると思われる。特に遠隔操作においては、コマンドの送信やシステム動作の開始・終了等のステータスの提示に加え、テレメトリ異常や不具合発生時などの警告、さらにマニュアル操作時の特異点や領域チェック、関節の Reach Limit 等への接近の警告等にも有効であると考えられる。

3.3 実験全体を通しての所感

- 第一世代の宇宙ロボットである SRMS に比べ、ETS-VII 搭載ロボットの運用においては自動化、省力化がかなり高いレベルで実現されていることを強く感じた。
- 一般に宇宙飛行士の軌道上作業割り当て時間の訓練時間に対する見積もり係数は、船内・船外活動とも習熟段階での地上訓練での作業時間の 1.2 から 1.3 倍程度である。今回の実験では短期間の訓練ではあったが、予定した各実験作業を完了するために要した遠隔操作時間は訓練時の 1.3 倍程度であった。ETS-VII 搭載ロボットの優れた操作性を認識すると共に、ETS-VII ロボットの実験運用システムが効率的な遠隔操作訓練を考慮した設計になっているという印象を持った。
- 特に、操縦桿の仕様や運用座標系の選択等に関して、有人宇宙ロボティクスと同様なものを ETS-VII 搭載ロボットが使用していることも、有人宇宙ロボティクスに関する操作経験を持つ者が比較的短い訓練時間で ETS-VII 搭載ロボットの遠隔操作を行うことを可能にしている理由の一つと考えられるが、前述した ISS ロボティクスにおける「共通化」の効果の好例であると言えよう。
- スペース・シャトルの運用では手順書は基本的に紙製、初期の ISS の運用では紙製と電子ファイルを併用する。これに対して、ETS-VII では実験運用における電子手順書が運用の効率化および省力化に大きく寄与して

いると感じた。

- NASDA 実験運用設備（図 5）におけるテレビカメラや予測グラフィックス以外のテレメトリおよびコマンド系では、遠隔制御コマンド用に 1 画面、テレメトリデータ用に 1 画面、計 2 画面の使用により効率的な運用が可能になっている。JEMRMS 等の有人ロボティクスの軌道上運用においても電子手順書に類するシステムを使用することになるが、電子手順書を中心としたコマンドおよびテレメトリのモニタには一つのラップトップコンピュータを使用するため、ETS-VII 搭載ロボットに比べ限られたディスプレイ領域を用いての効率的なコマンド送信とテレメトリ確認などの運用方法が要求される。ETS-VII 搭載ロボット実験運用でのコマンドおよびテレメトリ表示システムは有人も含めた今後の宇宙ロボティクス・システム運用の貴重な参考データになると思われる。

4. ISS 組立ミッション STS-92 でのロボティクス運用

昨年 11 月に建設が始まった ISS は、構成モジュール等を米露の打ち上げシステムを用い 40 回以上に分けて打ち上げ、軌道上で段階的に組み立てられるが、SRMS や SSRMS は組立作業において重要な役割を演じる。筆者が SRMS 操作を担当する予定である ISS 組立ミッション STS-92 では、電力供給モジュールの基部構造となる Z-1 トラスおよびスペースシャトルの ISS へのドッキング・ポートである PMA-3（Pressurized Mating Adapter-3、図 11、図 12 参照）を SRMS を用いて ISS 上のユニティ・モジュールに取り付ける。それぞれのモジュール間の固定は ISS の共通結合機構（CBM）を用いるが、STS-92 は SRMS による CBM 機構へのモジュール取り付け作業の最初のケースになる。CBM は取り付け作業の際に許容される位置および姿勢誤差が非常に小さく、さらに結合部分を直接目視あるいはカメラ映像で確認し難い作業になるため、Space Vision System（SVS）と呼ばれる計算機による画像処理

図 11 SRMS による PMA-3 取り付け作業

図 12 SVS に使用されるターゲットの例 (オービタ・コクピット上方の窓に取り付けられたテレビカメラからの映像)

を用いた位置・姿勢測定システムを使用して SRMS による取り付け作業を行う。SVS は ISS の組立において、視覚等による位置姿勢情報が確保できない場合のロボティクス操作では不可欠なシステムであり、これまで、位置・姿勢測定精度、軌道上での様々な照明環境での使用への対応、操作性向上・自動化等の面で改善が図られてきている。

5. お わ り に

1981 年に初飛行した SRMS に比べ、1997 年に打ち上げられた ETS-VII 搭載ロボットアームは地上からの遠隔操作、衛星姿勢との協調制御、運用や故障診断の自動化等、様々な新しい技術が取り入れられている。ETS-VII 搭載ロボットアームは、通信制約の大きい惑星探査ロボットや

軌道上サービスロボットへの応用技術はもちろん、今後、有人宇宙ロボティクスへの応用が期待できる技術や、さらに、月面そして火星への有人ミッション等におけるロボティクスと人間の協調的な役割分担を考えていく上でも貴重なデータを提供してきていると言える。

今回の ETS-VII 搭載ロボットアームの遠隔操作実験への参加は、今後の有人宇宙ロボティクスの開発に携わっていく上でも大変貴重な経験となった。実験に参加するにあたりお世話になった CRL, NAL および NASDA 各機関の実験運用チームの皆さんにこの場をお借りして感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- [1] 小田光茂：“技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) のミッションの概要”，宇宙開発事業団技術報告 NASDA-TMR-970002, 1997.
- [2] 長友正徳 他：“MFD 飛行運用とその成果”，マニピュレータ飛行実証試験 (MFD) シンポジウム前刷集, 1998.

若田光一 (Koichi Wakata)

1963 年生。埼玉県出身。1987 年九州大学工学部航空工学科卒業。1989 年同大学大学院工学研究科応用力学専攻修士課程修了。日本航空 (株) を経て、1992 年宇宙開発事業団入社。1993 年 NASA ミッション・スペシャリスト資格取得。1996 年 STS-72 ミッション搭乗。2000 年 STS-92 国際宇宙ステーション組み立てミッション搭乗予定。宇宙開発事業団有人宇宙活動推進室搭乗部員。

(日本ロボット学会正会員)