

委 23-1-4

技術試験衛星7型における
トラス構造物遠隔操作実験ミッションについて

平成11年6月16日

科学技術庁航空宇宙技術研究所

技術試験衛星7型(ETS-7)における

航技研のトラス構造物遠隔操作実験ミッションについて——

平成11年6月16日

1. トラス構造物遠隔操作実験の目的と経緯

宇宙開発においてトラス構造物は、当面の宇宙ステーションキール部に用いられ、将来的には、次世代宇宙ステーション、太陽発電衛星、あるいは超長期の宇宙ホテルなどの大型宇宙システムの基本構造物としての利用が考えられている。

大型宇宙システム構築にあたって、その構築作業を宇宙飛行士が直接行うことは船外活動の危険性の点からあまり望ましくなく、宇宙ロボットとその地上からの遠隔操作への期待が大きい。1983年に宇宙ステーション建設開始に先立ってまとめられたNASAのARAMIS報告書及びそれに続くいくつかのA&R報告でも、トラス構造物建設などの船外活動は宇宙ロボットとその遠隔操作に置き換えることが期待されている。

このため、航技研は軌道上トラス構造物を地上からの操作で構築するために必要な遠隔操作技術の研究開発を目指して、トラス構造物遠隔操作実験装置をETS-7に搭載し、平成10年初めより約1年半に渡り実験を継続し、平成11年5月28日をもって当初計画した実験を全て完了した。

2. 航技研の実験装置

2-1 ETS-7へ搭載した実験装置

航技研ではトラス構造物の遠隔操作実験モデルとして、図1のような供試体(TSE: Truss Structure Experiment)を開発しETS-7に搭載した。TSEはトラス構造物の基本要素として、展開型トラスと組立ジョイントの2種類を備え、トラス構造物の展開・収納作業実験と組立ジョイントの組立・分解作業実験ができる。

TSEの他の特徴には、ロボット専用把持具(GPF-N)がある。GPF-Nは他の実験装置の約1/4直径と小型であり、その把持にはETS-7ロボットをより厳しい先端位置精度で制御しなければならない。(表1)また、把持にあたっては、他の実験装置の把持動作がツール先端の指を開いて固定する開把持方式であるのに対して、把持具が小型であるGPF-Nは指を閉じつつ把持する閉把持方式を用いた。(図2)

2-2 筑波宇宙センターに設置した遠隔操作実験設備

筑波宇宙センター中央追跡管制所2階に設置した航技研遠隔操作実験設備を図3に示す。航技研遠隔実験設備の特徴として;

- 軌道上ロボット作業状況を再現するためグラフィックシミュレータを常用した。
- 実験の成立性を高めるため、手順検証・訓練用に供試体EMを用いたハードウェア・シミュレータを備えた。
- 最新の研究成果を様々な安全上の制約下でも実験出来るように研究ソフト用I/Fを設けた。

などがある。

3. 主な遠隔操作実験

航技研TSE実験では、トラス構築作業の基本要素として

- 展開型トラス構造物
- トラス組立ジョイント

の2つを作業対象としている。実験ではその展開・収納作業実験と組立ジョイントの組立・分解作業を地上から円滑に行うための、遠隔操作方式、支援方式、制御方式実験を試みた。

平成10年3月末の初期点検に始まり、本年5月までのトラス構造物遠隔操作実験の概要は以下のようにまとめられる。実験にあたっては殆どの項目で展開トラス及び組立ジョイントの両者を遠隔操作対象とした。(打上保持機構解除実験のみは(1)プログラム制御実験のみで行った。)

(1)プログラム制御での実験

(1-1)プログラム制御モードによる遠隔操作

(2)直接遠隔操作によるプログラム制御実験

(2-1)直接遠隔操作モードを用いたプログラム型遠隔操作

(3)直接遠隔操作支援手法の実験

(3-1)ビジュアルエイドによるジョイスティック直接遠隔操作

(3-2)作業発生力予測による地上からの直接遠隔制御

(3-3)カフィードバックジョイスティックによる直接遠隔操作

(3-4)4自由度カフィードバック遠隔操作実験

(3-5)仮想時間遅れによる遠隔操作支援方式

(3-6)カテレメトリフィードバック地上制御実験

(3-7)長時間遅れ遠隔操作実験

(3-8)バーチャルリアリティによる遠隔操作

(3-9)宇宙飛行士遠隔操作支援

(4)ロボットアーム制御に関する実験

(4-1)力追従制御実験

(4-2)遠隔ディザ制御実験

(4-3)アーム手先高精度制御と関節ガタ計測

特に、(3)直接遠隔操作支援方式研究では、作業対象であるトラスの配置が設計値からズレた場合を想定し、そのような場合にも通信に遅れのある環境下で操作者の判断を支援出来る遠隔操作方式の研究を中心に進めてきた。

また、ETS-7開発計画開始時点に比べ地上でのロボット操作研究の進展は著しいものがあり、これらを組み込んだ新しい支援手法、制御方式での実験を行うため、(3)、(4)の実験では2-2に述べた研究ソフト用I/F及びその事前確認のためのハードウェアシミュレータを必須として実験を進めた。

昨年3月より今年5月までの実験実施日とその主要実験項目詳細を表2に示す。また、各実験の概要を添付に示す。

4. 今後の予定

6月より11月まで計画されているETS-7後期利用において、航技研実験にも約8回の実験機会が予定されている。航技研ではこの貴重な実験機会を活用して、地上遠隔操作支援技術の研究をさらに進めるとともに、宇宙ロボット関連研究の大学との共同研究実験等も検討している。

また、これらの宇宙ロボット遠隔操作技術実験を通じて得られた貴重な成果を、今後は、当所の宇宙環境安全・利用プロジェクト研究や将来の月・惑星利用研究へ応用していく計画である。

5. まとめ

トラス構造物遠隔操作実験は、我が国がJEM曝露部用に開発した小型アームにより、同アームの捜査対象として当初予定した軌道上交換ユニット(ORU)を超える小型、複雑形状の作業対象も地上遠隔操作可能であることを示した。また、軌道上作業に不可避の通信遅れや位置ズレ／誤差などがあっても地上遠隔操作を可能にし得る、いくつかの手法の有効性が確認された。

ETS-7は定常段階最終段階である5月末においても、軌道上遠隔操作ロボット実験衛星として健在であるので、後期利用におけるさらなる地上遠隔操作支援手法の実証実験へ向けてその準備を進めている。

また、航技研は本ETS-7トラス構造物遠隔操作実験により、衛星搭載機器開発及びその地上運用の経験に係わる貴重な蓄積できたので、これらの経験を今後の宇宙技術研究に活用していくことを目指す。

補足資料:

1. 航技研実験装置——TSE(トラス構造物実験装置)

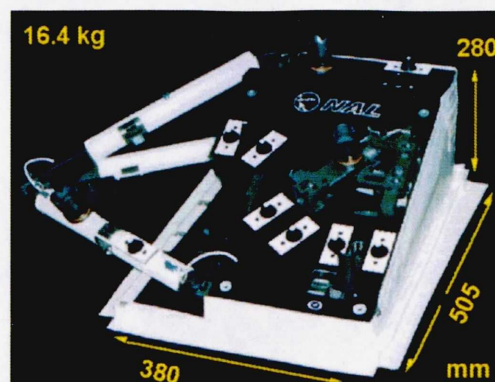
図1

○トラス構造物実験装置

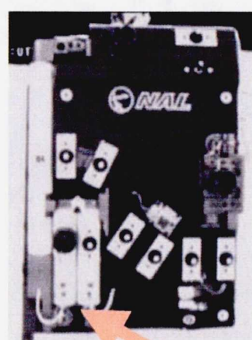
図1に示すトラス構造物実験装置は航技研が研究開発し、技術試験衛星7型(ETS-7)のロボット実験面に取り付けられて打ち上げられた。

主要構成要素は以下の2点

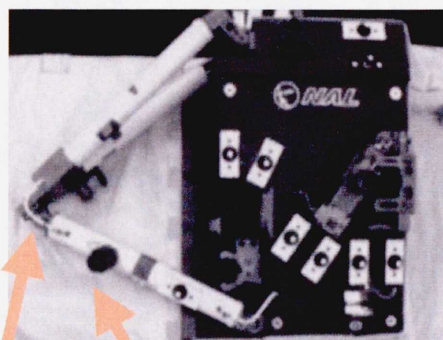
- 展開型トラス構造物
- トラス組立ジョイント



○展開型トラス構造物



収納状態
(打上時)

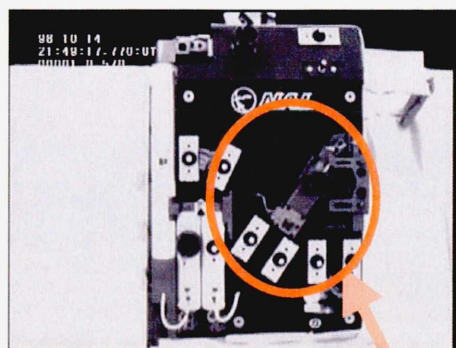


展開状態

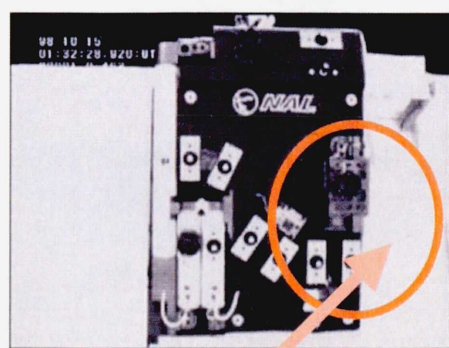
展開トラス構造物

ロボット把持部分(GPF-N)

○トラス組立ジョイント



トラス組立ジョイント (組立状態)



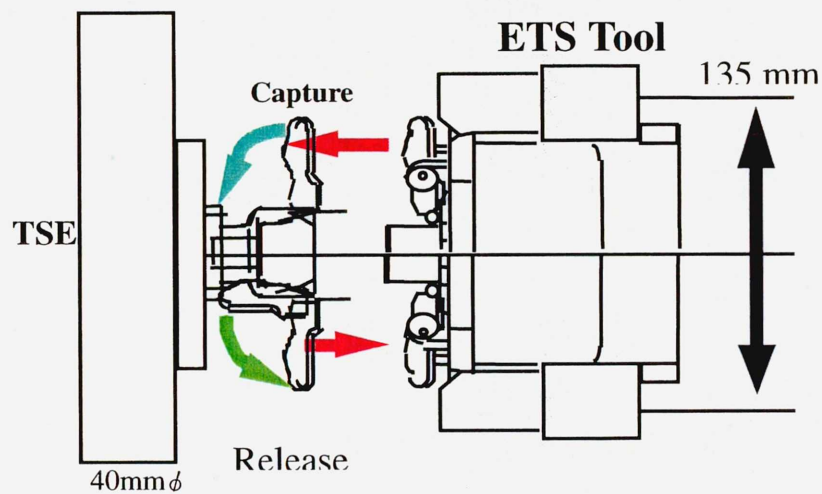
(分解状態)

表1 ETS-7アームの把持条件

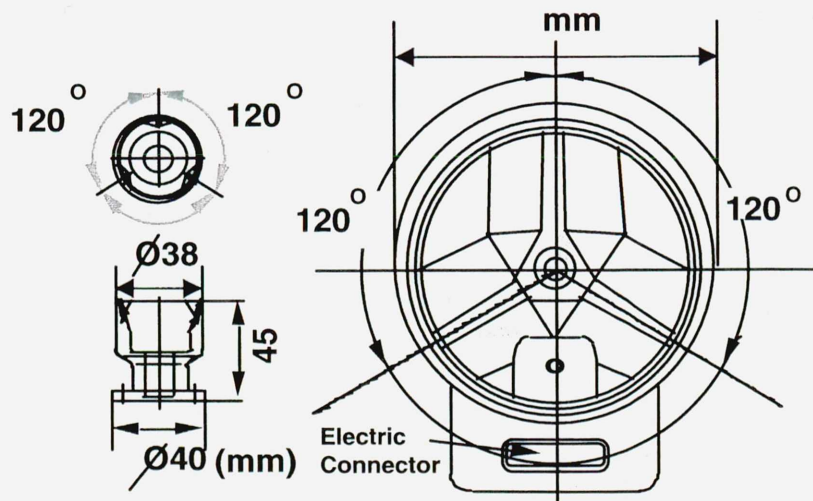
	開 把 持	閉 把 持
軸方向 (mm)	± 5 以上	± 3 以上
軸ラジアル (mm)	5 以上	1 以上
軸まわり (deg)	± 3 以上	± 2 以上
軸たおれ (deg)	± 3 以上	± 2 以上

2. 航技研専用把持具GPF-Nと閉把持

図 2



トラスの閉把持



GPF-N

ETS-7標準把持具(ARH用)

3. 航技研の地上遠隔操作実験

図 3

(1) ETS-7のロボット制御の概要

航技研設備からETS-7ロボットの遠隔操作制御には

プログラム制御モード

直接遠隔操作モード

の2種類が可能。

制御コマンド 4Hz 軌道上送信

実験データは 10Hz 地上受信

映像 4Hz 地上受信

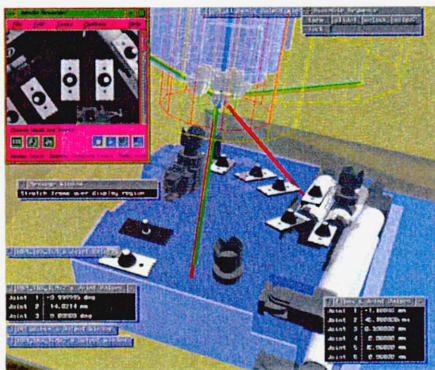


(2) 航技研の地上遠隔操作設備

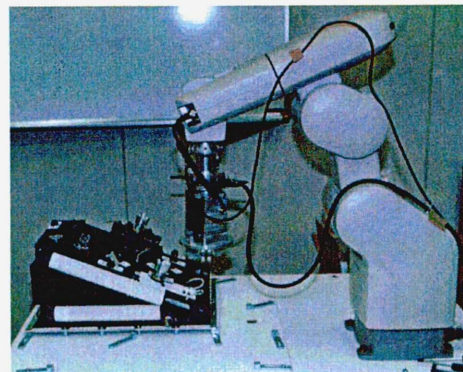
航技研のTSE遠隔操作実験設備の特徴として

- 軌道上作業を模擬するグラフィックシミュレータ
- 事前実験準備のためのハードウェアシミュレータ
- 研究ソフトウェア用I/F

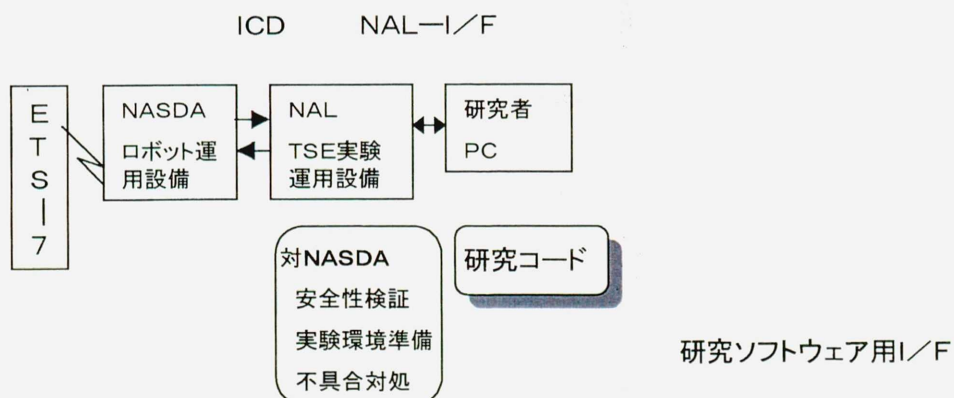
を備えている。



作業模擬グラフィック・シミュレータ



実験準備ハードウェア・シミュレータ



4. 実験した主な遠隔操作方式について

4. 1 基本的な宇宙ロボットの遠隔操作モードについて

前期は宇宙ロボット遠隔操作方式の基本的手法によるトラス構造物操作技術の実験を行った。

(1) プログラム制御モードによる遠隔操作

2点間の直線移動を基本とする、いわゆる「プログラム制御モード」での遠隔操作実験を行った。

設計値及び地上ハードウェア・シミュレータ試験結果を用いて作業をロボット制御基本操作プログラムで表し、これに若干の微調整プログラムを準備しておくことにより、ロンチロック機構解除、トラスの展開・収納、及び組立ジョイントの組立・分解の3作業を地上から遠隔操作できた。

(2) 直接遠隔操作モードを用いたプログラム型遠隔操作

「直接遠隔操作モード」とは地上から軌道上アームに向けて4Hzで直接制御指令を送る遠隔操作手法である。

「直接遠隔操作」では細かな動作指示を地上から指示できるため、アームの作業力の発生状況をプログラム制御モードより詳細に制御できる。航技研では、これを用いたプログラム制御を開発し、より滑らかなプログラム制御型遠隔操作を実現した。アーム先端の移動を細かく制御出来るようになったため、トラス展開・収納作業でのロボット先端力も減少した。

3. 1 遠隔操作支援技術の高度化を目指して。

後期の実験では、宇宙飛行士が軌道上でロボットアームをジョイスティックなどで3次元運動を自由に操作し様々な作業を柔軟に行っているような、自由で柔軟な作業性／操作性が可能な地上遠隔操作を目指した実験を進めた。

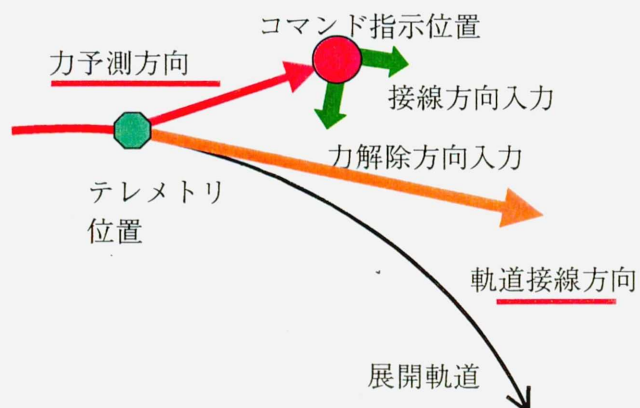
以下の実験の過半は、2. (2)に前述した「ソフトウェア用I/F」を用いて各研究テーマ提案者が自作したソフトで実施した。

主な支援方式として

(3) ビジュアルエイドによるジョイスティック直接遠隔操作

* 推定された軌道の接線方向ベクトルとアームの力印加方向をグラフィック表示し、オペレータが両方向を一致させるようにジョイスティック操作する手法。

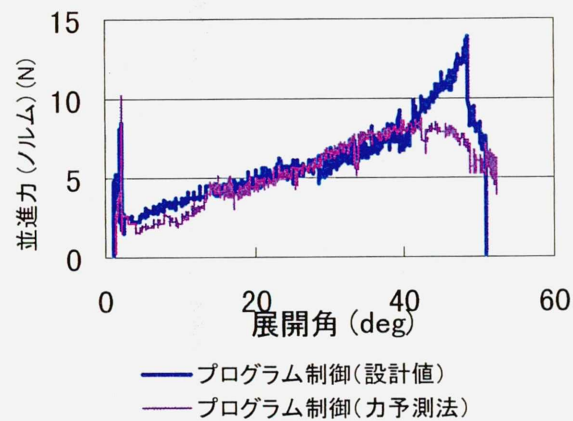
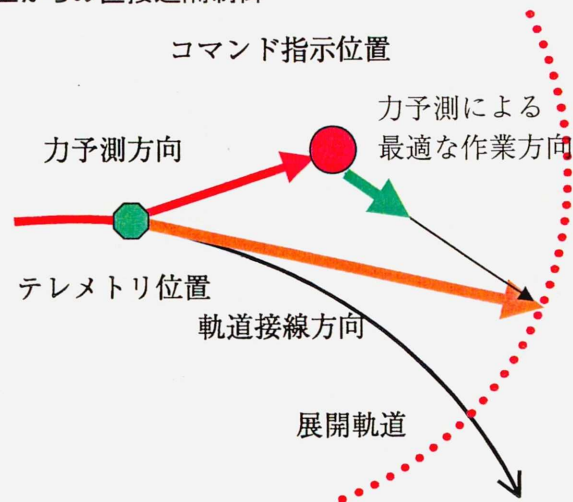
* これによって不測の事態などで作業対象の運動や作業軌道が不正確になった状況でも遠隔作業が可能になった。



(4) 作業発生力予測による地上からの直接遠隔制御

* アーム手先テレメトリデータ(5.5秒前)と現在のアーム移動指示位置から操作に伴って発生するアーム先端力を予測し、その作用方向及び大きさをプログラム制御する手法。

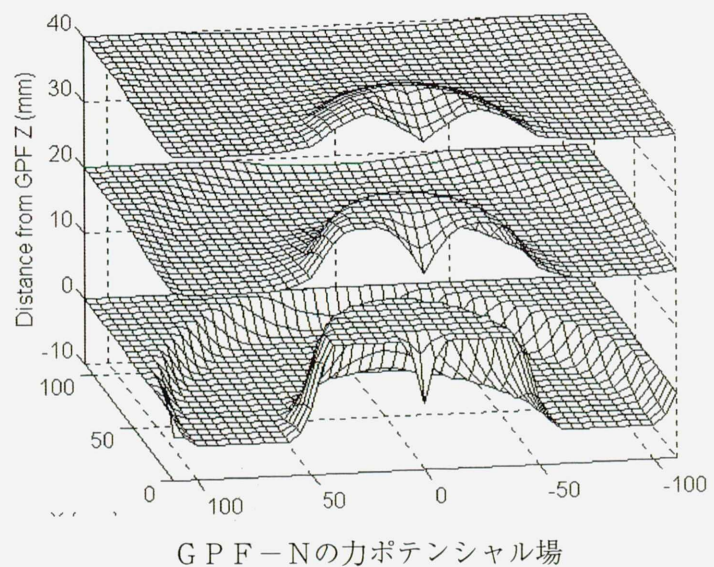
* これにより、軌道上ー地上を制御ループとしたフィードバック制御を試み、良好な結果が得られた。



(5) カフィードバックジョイスティックによる直接遠隔操作

* 設計データなどに基づく力のポテンシャル場を求めオペレータに操作方向を指示するガイドとして力感覚フィードバックを与える手法。

* これにより遠隔操作結果を力感覚として受け取れるので通信に遅れがある環境でも、オペレータの迅速で正確な遠隔操作が行えた。

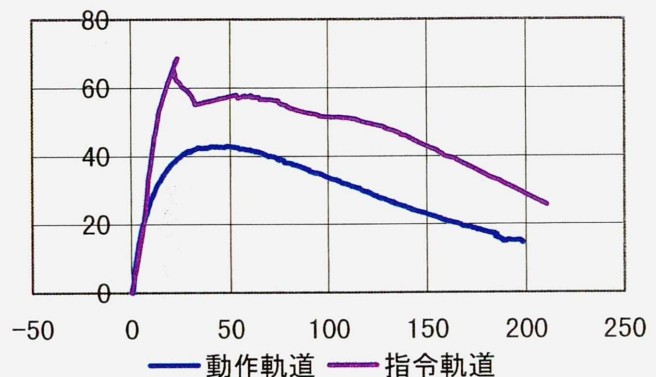


(6) 4自由度力フィードバック遠隔操作実験

- * 力感覚フィードバックを与えるジョイスティックを増設し、左右合計4自由度分の力感覚フィードバックを可能にした。
- * これにより、作業遂行上重要な4自由度分の操作ガイドを力感覚として提示できるようになった。実験ではこの力感覚フィードバックのみでの支援により、トラス展開作業を行えることが示された。

(7) 仮想時間遅れによる遠隔操作支援方式

- * 通信の遅れが5秒近くあると、その遅れが数秒増加しても遠隔操作の操作性にはあまり影響が発生しない。これを利用して、遠隔操作システムに余分な通信遅れ時間を数秒附加し、オペレータ操作による干渉発生などの場合に遠隔操作指令を遡って再編集し、障害からの退避復旧動作を不要にした。
- * これにより、遠隔操作によって周辺を損傷したり、作業力が過大になることを防止できることが示された。



仮想時間遅れによる収納軌跡

(8) カテレメトリフィードバック地上制御実験

- * テレメトリデータとして得られるETS-7ロボットアームカトルクセンサー値を地上で制御系に組み込み、通信遅れのある制御系でのカセンサー値によるフィードバック制御を試みた。
- * 制御パラメータ及び制御式の調整により時間遅れが約6秒のシステムETS-7実験環境でもカテレメトリフィードバックが可能であることが示された。

(9) 長時間遅れ遠隔操作実験

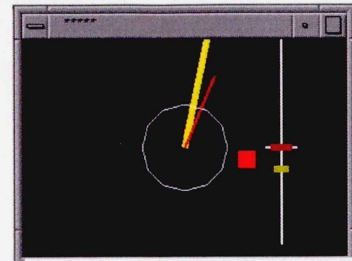
- * ETS-7ロボット実験系の通信遅れは約6秒であり、シャトルなどと同様である。本実験では、作業環境として月面を想定し、月周辺作業に予想される15秒程度の遅れの下でも、本研究による遠隔操作支援方式が有効であることを確認する。
- * ビジュアルエイド支援により15秒の通信遅れ環境下でもジョイスティック直接遠隔操作により作業が遂行できることが確認された。

(10) バーチャルリアリティによる遠隔操作

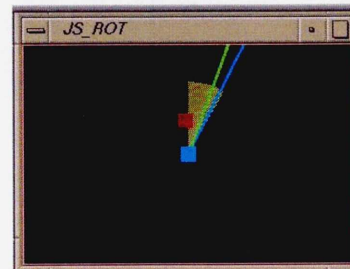
- * これまでの遠隔操作実験の結果、グラフィックシミュレータによる作業環境模擬精度の向上が見られたため、アーム手先カメラ画像が得られない環境での実験実施の可能性を確認する実験を試みた。
- * 現在の航技研グラフィックシミュレータ精度は、アーム手先カメラ映像が無くてもGPF-N把持に十分な操作支援を行えるレベルであることが確認された。

(11) 宇宙飛行士による地上遠隔操作支援

- *トラス展開・収納作業支援のビジュアルエイド方式の有効性が実験で確認されたため、軌道上ロボット遠隔操作訓練を修了している専門家である宇宙開発事業団若田宇宙飛行士に、同方式の有効性評価を実施して頂く実験を試みた。
- *2日間延べ約4時間のハードウェアシミュレータ訓練の後、ETS-7実機実験を行った。同飛行士は力制御機能を備えていないシャトルアームの慎重な操作に習熟しているため、地上遠隔操作においても操作支援ガイドに忠実にジョイスティックを微妙に操作する実績を示し、良好な地上遠隔操作を達成した。



アーム位置指示ガイド



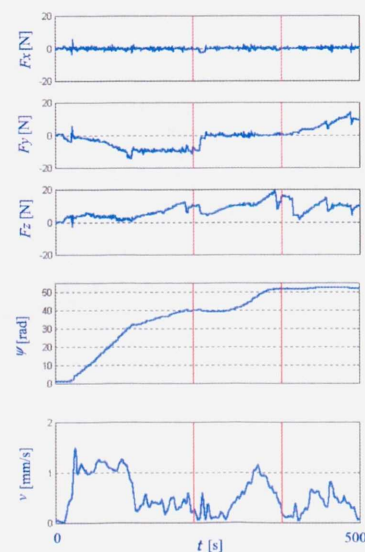
手先の姿勢指示ガイド

ジョイスティック直接遠隔操作グラフィック支援画面

- 青線: これまでの手先の進行方向
- 赤線: 手先の進行方向の指示方向
- 黄線: 軌道の接線ベクトル

(12) 力追従制御実験

- *ETS-7ロボットアームの力制御の一つとして開発された力追従制御によりトラス展開、収納、及びトラスジョイント組立を試みた。力追従制御の場合、原理的に作業の概ねの方向が判明していればトラス展開収納が可能のはずと考えられる。また、組み立て作業では作業時の横方向摩擦力の解消が期待できる。
- *これにより、作業力の最大値を抑えつつ作業が出来ることが示された。



力追従による展開作業

(13) 遠隔ディザーク制御実験

*トラス組立ジョイント内部の過大な機構摩擦を解消するため、振動周期2Hz程度のディザーク制御を試みた。

*遠隔ディザーク制御の結果組立には成功したが、トラス組立ジョイントの組立作業時の機構／技術課題については検討不十分な点が多数残っているため、今後より詳細な検討をすすめ、再実験を試みる。

(14) アーム手先高精度制御と関節ガタ計測実験

*ETS-7アームの先端位置繰り返し制御精度は仕様上 $\pm 2.5\text{mm}$ となっている。本実験では、その制御精度を計測するためアーム先端に微小な運動をさせるとともに、単純ガタモデルによる高精度制御を試みる。

*本実験はMFD実験の追試であるが、MFDアームとETS-7アームのハーネス実装方式などの違いなどのため、微小動作に大きな違いが現れており、現在解析を進めている。

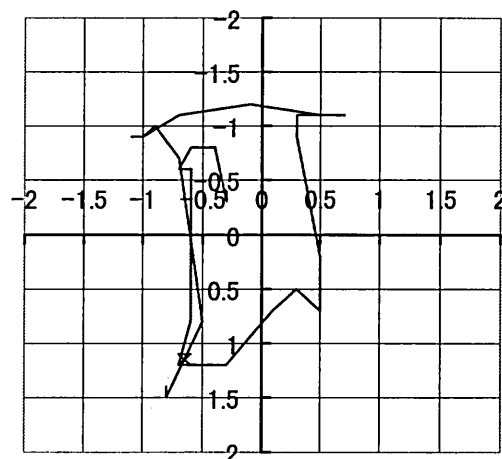
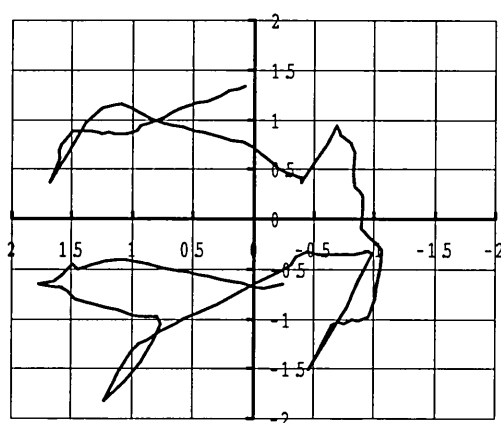


図1 ETS-VII(左)及びMFD(右)における微小動作結果
(関節ガタの初期化後、同一条件で1辺2mmの微小四角形を描かせたときの手先軌跡)

表 2

主な実験実施時期と実験項目

(1)H10.5.28	打上保持機構解除、トラス初期操作
(2)H10.6.11-12	プログラム制御モードトラス作業初期実験(その1)
(3)H10.7.27-28	プログラム制御モードトラス作業初期実験(その2)
(4)H10.10.14-15	直接遠隔操作モードトラス作業実験
(5)H10.11.25-26	ジョイスティック操作トラス作業実験
(6)H10.12.10	ビジュアルエイド遠隔操作支援実験
	カフィードバック遠隔操作支援実験
(7)H11.1.19-20,27	力追従制御実験
	バーチャルリアリティ遠隔操作実験
	アーム手先高精度制御実験
	ビジュアルエイド遠隔操作支援実験(その2)2
(8)H11.2.17-19	力予測地上制御遠隔操作実験
	ビジュアルエイド遠隔操作支援実験(その3)
	カフィードバック遠隔操作支援実験(その2)
	力追従制御実験(その2)
(9)H11.3.16-19	宇宙飛行士遠隔操作支援実験
	遠隔ディザイア制御実験
	ビジュアルエイド遠隔操作支援実験(その4)
	カフィードバック遠隔操作支援実験(その3)
	力追従制御実験(その3)
	力予測地上制御遠隔操作実験(その2)
(10)H11.4.14-16	仮想時間遅れ遠隔操作支援実験
	力追従組立制御実験
	カフィードバック遠隔操作支援実験(その4)
	バーチャルリアリティ遠隔操作実験(その2)
(11)H11.5.21,27-28	長時間遅れ遠隔操作実験
	4自由度カフィードバック遠隔操作実験
	カテレメトリ地上制御実験
	仮想時間遅れ遠隔操作支援実験(その2)
	バーチャルリアリティ遠隔操作実験(その2)
	カフィードバック遠隔操作支援実験(その4)
	アーム手先高精度制御実験(その2)