

第5回宇宙開発委員会（定例会議）

議事次第

1. 日 時 平成11年2月3日（水）
14:00～

2. 場 所 科学技術庁 委員会会議室

3. 議 題 (1) 技術試験衛星VII型「きく7号」(ETS-VII)によるロボットアーム実験について
(2) その他

4. 資 料 委5-1 技術試験衛星VII型(ETS-VII)の宇宙ロボット実験
-航技研:トラス構造物遠隔操作実験
委5-2-1 第3回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨
委5-2-2 第4回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨（案）

委 5-1

技術試験衛星7型（ETS-7）の
宇宙ロボット実験

—トラス構造物遠隔操作実験—

平成11年2月3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）の宇宙ロボット実験

——航技研：トラス構造物遠隔操作実験——

平成11年2月3日

1. 実験の目的

トラス構造物の宇宙開発における活用は、当面の宇宙ステーションキール部に続く将来として、太陽発電衛星、大型宇宙プラットフォームや次世代宇宙ステーション、あるいは超長期の宇宙ホテルなどの基本構造物としての利用が考えられる。

このような軌道上大型システムを構築する場合、その建設作業を宇宙飛行士が直接行なうことは船外活動の危険性の点からあまり考えられない。地上でも危険作業とされている建設作業などでは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報告でも建設などの船外活動を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。（図1）

2. 航技研の実験装置

2-1 ETS-7へ搭載した実験装置

航技研はトラス構造物の宇宙ロボットによる操作とその地上遠隔操作の実験を行うため、図2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の他の特徴としては、ロボット専用把持具（GPF-N）が他の実験装置の約1/4直径と小型であり、ETS-7ロボット制御に対してより厳しい先端位置制御精度を必要とした。

2-2 筑波宇宙センターに設置した遠隔操作実験設備

ETS-7の宇宙ロボットによるトラス構造物の地上遠隔操作実験を行うため、筑波宇宙センター中央追跡管制所に航技研の遠隔操作実験設備を設置した。（図3）

本設備の特徴には；

- 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多用する。
- 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。
- 衛星通信などのロボット実験操作以外の実験関連機能はNASA設備を活用する。

などがある。

3. 主な実験結果

平成10年3月末の初期点検に始まる一連の実験は以下のようにまとめられる。

- プログラム制御での実験
- 直接遠隔操作によるプログラム制御実験
- 直接遠隔操作支援手法の実験
- ロボットアーム制御に関する実験

3-1. プログラム制御での実験

【実験概要】

7月までの実験では、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・分解の三つの作業を地上遠隔操作で行った。

【実験結果】

作業の正確さが高度に要求されるジョイント組立実験では、地上EMと打上モデルの微小な違い、ETS-7ロボットアームの精度の制約、及びプログラム制御モードでのアーム先端力維持方式の制約などから、組立作業の完全な完了までには4回の試行操作を要した。

3-2. 直接遠隔操作によるプログラム制御実験

【実験概要】

10月からはNASDAがTDRS対応の改修を行った「直接遠隔操作」機能を活用した実験に移行した。

「直接遠隔操作」では細かな動作指示を周期4Hzで、航技研設備より直接ETS-7ロボットアームに送信できる。このため、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も詳細に制御でき、滑らかなプログラム制御遠隔操作が可能になった。

【実験結果】

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・収納作業を滑らかに制御出来た。また、アーム先端力を連続的に制御出来るようになったため、ジョイント組立作業で難航していたジョイント挿入作業も地上から円滑に制御でき1回の試行で組立も完了した。(図4, 5)

3-3. 直接遠隔操作支援手法の実験 ——地上からの自由な直接遠隔操作

【実験概要】

11月の実験からは、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ている。

このための主な課題として以下の2課題を中心に実験を進めている。

(1)動作軌道が不明あるいは不正確な作業対象の操作：打上振動、温度変化、運動推定精度、あるいは作業上の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る状況への対応を目指す。

●軌道接線ベクトルのグラフィック表示による動作指示／支援 (図6)

●力予測手法とそれによる軌道上—地上フィードバック制御 (図7)

(2)通信時間遅れの下での操作性向上：軌道上—地上間の約5.5秒の通信遅れによる「ムーブ＆ウェイト」動作を解消し、滑らかな遠隔操作を可能にすることを目指す。

●オペレータへの力感覚フィードバック支援 (図8)

●仮想時間遅れによる支援

また、これらの実験は全て研究ソフト用I/Fを用いて行っている。

【実験結果】

宇宙作業テレオペレーションでは地上では当然とされているティーチング・プレー バック（作業教示）が出来ない。また遠隔操作通信システムに多大な遅れが避けられない。これに対応する支援手法として、極力、汎用性のある支援技術の実現を目指して実験を進めている。これまでに補足に示すような3種類の支援手法の実験を行い、良好な成果を得ている。

3-4. ロボットアーム制御に関する実験

【実験概要】

宇宙ロボットは真空環境で動作をするため、関節部材やモータ部分を真空潤滑しなければならなく、地上の通常のロボットに比べアーム先端位置制御精度が極めて劣悪である。このため、ロボットアーム制御の向上を目指した実験として以下の実験を進めている。

●軌道拘束された対象の力追従制御による作業性評価

●アーム関節ガタ評価及び微小重力下でのアーム先端位置高精度制御

【実験結果】

ロボットアーム制御は設計に深く関わる課題であり、アーム開発者であるNAS DAとの連携の下に実験を進めている。関節ガタ評価については1昨年のMFD実験のデータとの特性の違いも見られており、今後ガタモデルの改良が必要である。力追従制御については第1回の実験が終了したところであり、現在解析を進めている。

4. 今後の予定

航技研は全体で28日間の実験日数を予定しており、これまで初期点検に始まる16日間の実験を行った。今後5月末のETS-7ミッション完了日まで、月に3日間平均で実験を進めていく予定である。

実験内容としてはこれまでの実験で予定していた

- 初期段階（2日間）： ロンチロック解除など
- 基礎実験（8日間）： 展開トラス及び組立ジョイントの基本操作実験
(プログラム制御、直接遠隔操作プログラム制御)
- 基本実験（11日間）： 種々の遠隔操作支援手法実験
- 発展実験（7日間）： 遠隔操作の高度化
(VR (バーチャルリアリティ) 遠隔操作、
長時間通信遅れなど)

を順調に実施しており、現在、基本実験段階の半ばにさしかかっている。今後は現在の遠隔操作支援手法を改良し、より汎用的な手法を目指し、作業時間、操作性などを向上させる。

また、将来の月、火星での遠隔操作を目指して、データ通信量の軽減のためのVR技術活用、通信時間遅れの長時間化対応などの実験も進める。

補足

【直接遠隔操作支援手法】

(1) 軌道接線ベクトルのグラフィック表示による動作指示／支援

- * 推定された作業軌道の接線ベクトルとアームの移動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。
- * 11月実験以来グラフィック表示を改良しつつ進めており、本手法で作業軌道が不明な場合でも通信の遅れの下で遠隔操作が可能であることが示された。

(2) 力予測手法とそれによる軌道上一地上フィードバック制御

- * 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。
- * 1月実験において初めて軌道上一地上を制御ループとして本手法によるフィードバック制御を試みた。

(3) オペレータへの力感覚フィードバック支援

- * 設計データ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。遠隔操作結果を力感覚として受け取れるため、オペレータの迅速で正確な操作が期待できる。
- * 2次元力感覚フィードバック・ジョイスティックを用いて、アーム先端を専用把持具（G P F - N）に挿入する実験を12月に成功させた。今後は力センサー・テレメトリ・データと融合した力感覚フィードバックを試みる。

(4) 仮想時間遅れによる支援

- * 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する手法。
- * 3月以降の実施を目指して準備中。

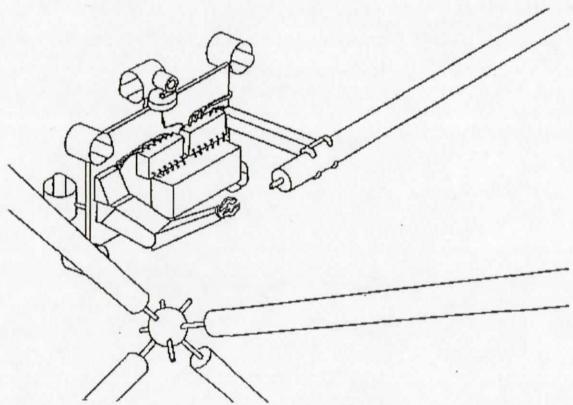


図1 MITのビーム組立テロボティクス
(NASA CR3734、1983)

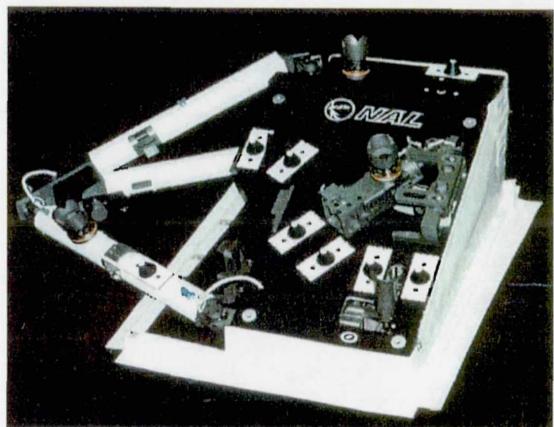


図2 航技研供試体
TSE (Truss Structure Experiment)

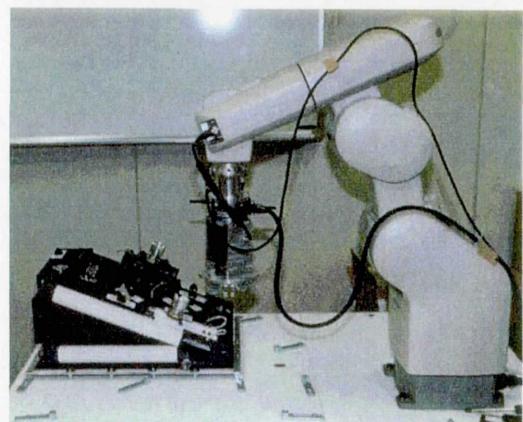


図3 航技研遠隔操作実験設備とハードウェア・シミュレータ

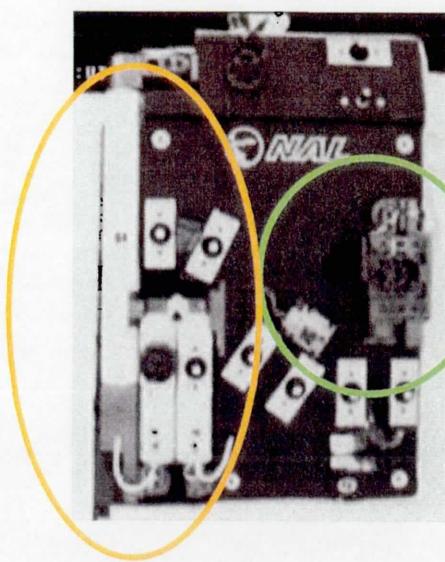


図4 収納状態のTSE

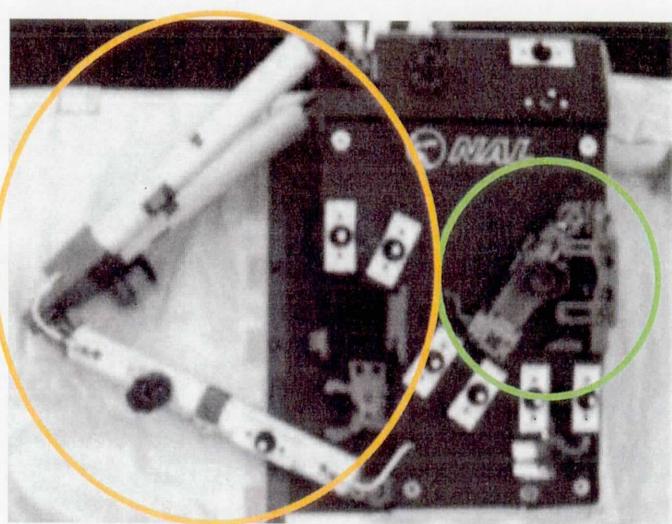


図5 ト拉斯展開、ジョイント組立されたTSE



：展開ト拉斯



：組立ジョイント



図6 軌道接線ベクトルの
グラフィック表示

青線：推定された接線ベクトル
赤線：アーム動作方向
橙線：地上試験軌跡の接線ベクトル
黄線：地上試験の手先座標系
緑線：テレメトリの手先座標系



図7 力予測による操作支援

左：並進JS操作支援
右：姿勢JS操作支援

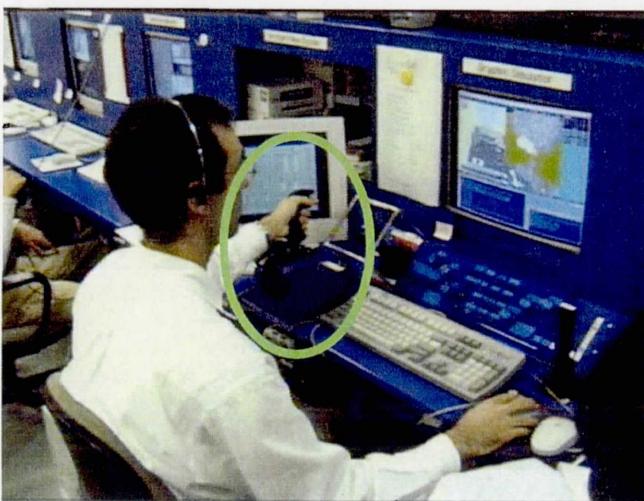


図8 力感覚フィードバック操作

○ 力フィードバックJS

第3回宇宙開発委員会（定例会議）
議事要旨

1. 日 時 平成11年1月20日（水）
11:25～11:50
2. 場 所 委員会会議室
3. 議 題 (1) 宇宙開発委員会委員長代理の指名について
(2) 向井宇宙飛行士の帰国報告について
(3) その他
4. 資 料 委3-1 第2回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨（案）

5. 出席者

宇宙開発委員会委員長	有馬 朗人
宇宙開発委員会委員長代理	長柄 喜一郎
宇宙開発委員会委員	秋葉 鎧二郎
"	松安 晴
"	田茂 生

関係省庁

文部大臣官房審議官（学術国際局担当）	若松 澄夫（代理）
通商産業省機械情報産業局次長	林良造（代理）
郵政大臣官房技術総括審議官	甕昭男（代理）

事務局

科学技術庁研究開発局長	池田 要
科学技術庁長官官房審議官	中原 佐市
科学技術庁研究開発局宇宙政策課長	船橋 英夫

6. 議 事

- (1) 宇宙開発委員会委員長代理の指名について
有馬 朗人 宇宙開発委員会委員長は、長柄 喜一郎 委員を委員長代理に指名した。
また、長柄委員が不在の際には、秋葉 鎧二郎 委員を委員長代理とすることとした。
- (2) 向井宇宙飛行士の帰国報告について
宇宙開発事業団 向井宇宙飛行士より、STS-95における活動結果について、
報告があった後、委員との意見交換が行われた。
- (3) その他
事務局より、第2回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨（案）について説明があ
った後、原案通り了承された。（資料委3-1参照）

第4回宇宙開発委員会（定例会議）
議事要旨（案）

1. 日 時 平成11年1月27日（水）
14:00～15:00
2. 場 所 委員会会議室
3. 議 題 (1) 第17号科学衛星（LUNAR-A）の打上げについて
(2) 第2回NASDA/CNES共催日仏宇宙協力シンポジウムの開催について
(3) その他
4. 資 料 委4-1 第17号科学衛星（LUNAR-A）の打上げについて
委4-2 第2回NASDA/CNES共催日仏宇宙協力シンポジウム
の開催について
委4-3 第3回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨（案）

5. 出席者

宇宙開発委員会委員長代理	長 柄 喜一郎
宇宙開発委員会委員	秋 葉 鎧二郎
"	末 松 安 晴
"	澤 田 茂 生

関係省庁

文部大臣官房審議官（学術国際局担当）	若 松 澄 夫（代理）
通商産業省機械情報産業局次長	林 良 造（代理）
郵政大臣官房技術総括審議官	鹽 昭 男（代理）

事務局

科学技術庁長官官房審議官	中 澤 佐 市
科学技術庁研究開発局宇宙政策課長	船 橋 英 夫 他

6. 議 事

- (1) 第17号科学衛星（LUNAR-A）の打上げについて
文部省宇宙科学研究所より、第17号科学衛星（LUNAR-A）の試験状況について、報告があった。（資料委4-1参照）
- (2) 第2回NASDA/CNES共催日仏宇宙協力シンポジウムの開催について
宇宙開発事業団より、第2回NASDA/CNES共催日仏宇宙協力シンポジウムの開催について、報告があった。（資料委4-2参照）
- (3) その他
事務局より、第3回宇宙開発委員会（定例会議）議事要旨（案）は、（1）宇宙開発委員会委員長代理の指名について、「また、長柄委員が不在の際には、秋葉 鎧二郎委員を委員長代理とすることとした。」と追加の上、了承された。（資料委4-3参照）

以 上