

## 〔事例紹介〕

## 宇宙実験用テレオペレーションシステム\*

渡辺 一郎\*\* 内山 隆\*\*

## 1. はじめに

1990年代後半に建設が予定されている宇宙ステーションでは、微小重力等の宇宙空間特有の環境を利用して、材料やライフサイエンス分野の各種の実験が計画されている。このような宇宙環境利用実験ではクルーの作業時間不足、宇宙実験のスループット向上等の問題が提起されている。これらを解決し、かつ地上の科学者の知識を活用する方法としてテレサイエンスの概念の導入が提案されている。しかし、テレサイエンスの概念を具体化するには未だ不明点が多い。これを明らかにするために、地上での模擬実験が有効である。筆者らはテレサイエンス技術に対するイメージの明確化を主眼として、テレオペレーション系（マニピュレータ含む）、テレプレゼン

ス系等、テレサイエンスの主要技術を含むシステムを構築し、昭和63年11月7、8日に地上での公開模擬実験をおこなったので紹介する。

## 2. 地上模擬実験の目的

今回の地上模擬実験は、

- ①テレサイエンスの実現にあたっての技術的問題点の抽出、
- ②実験実施者からのテレサイエンスシステムに対する要求の明確化、

原稿受付 1989年9月28日

\* A Teleoperation System for Space Experiments

\*\* 株式会社富士通研究所 宇宙メカトロニクス研究部

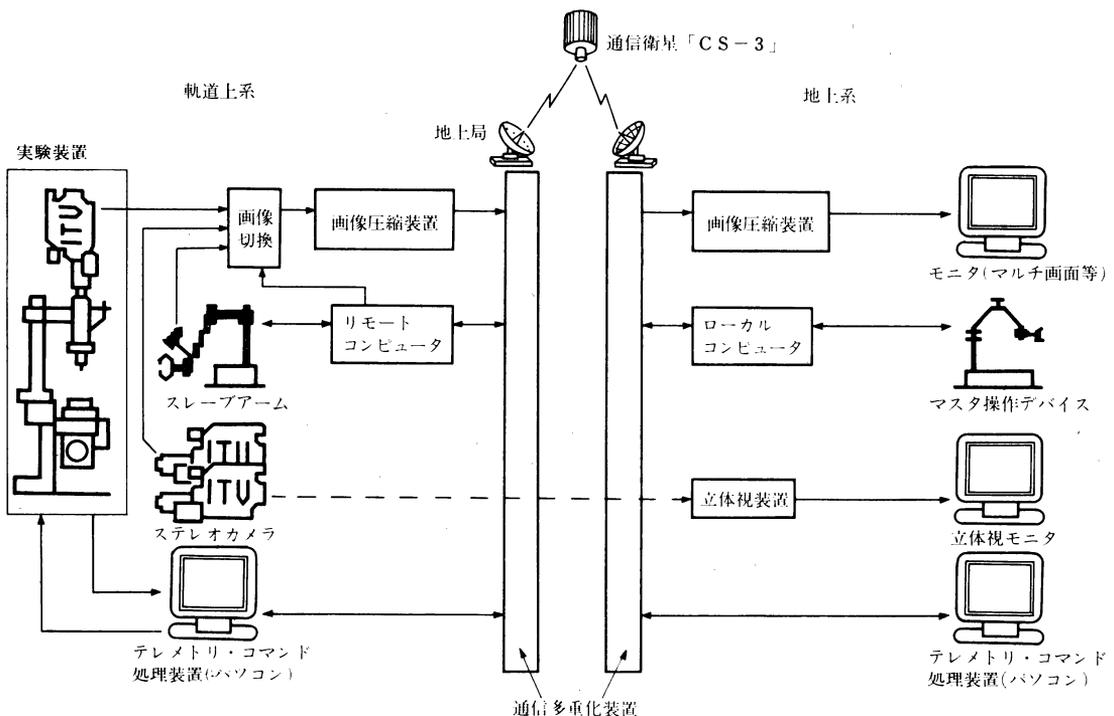


図1 模擬実験システムの構成



写真 1 軌道上系の外観



写真 2 地上系の外観

- ③時間遅れを伴う遠隔操作の運用性の検証,
- ④小型コンピュータの操作限界およびテレプレゼンスの分解能等に対する評価を目的として実施した。

### 3. 実験システムの構成

図1に地上模擬実験システムの構成を示す。マニピュレータの遠隔操作系、環境画像の呈示系、テレメトリ・コマンド処理系等はそれぞれ独立した系で、地上-軌道上間は、多重化通信装置を介して通信衛星「CS-3」により結合されている。この場合、地上系・軌道上系間で片道0.25秒の通信時間を要した。したがって、軌道上環境のモニタ画像を見ながら操作指令を出すオペレータにとっては、往復0.5秒の時間遅れを感じながらの遠隔実験となった。遠隔実験の遂行は軌道上のスレーブアームが行い、その動作はすべて、地上のオペレータの遠隔操作による。

また、地上系、軌道上系の装置は、それぞれ別の部屋に設置し、オペレータが軌道上の状態を直視出来ないよう配慮した。(カメラ画像のみにより遠隔操作した。)

地上側から指示を送るオペレータは2人で、マニピュレータの遠隔操作を行う者が1名、テレメトリ・コマンド装置を用いて周辺実験機器の操作を行う者が1名である。

以下に、各装置の概要を示す。また、軌道上系、地上系の構成外観を、写真1, 2に示す。

表 1 使用したマニピュレータの諸元

形 式	垂直多関節型
自 由 度	6
ア ー ム 長	660mm
可 搬 重 量	2.0kg
位 置 繰 返 精 度	±0.03mm

#### 3.1 軌道上系

##### (1) スレーブアーム

6自由度垂直多関節型マニピュレータ(富士通製 FAROT-M 6 250 II)の手首部に、手先での発生力を検出して地上のオペレータにフィードバックするための6軸力センサを取り付け、その先端に開閉型のグリッパを設置した構成とした。表1に使用したマニピュレータの性能諸元を示す。

##### (2) 実験機器

後章で述べるライフサイエンス実験を行うために実体顕微鏡を用意した。顕微鏡下には、試料の位置決めおよびフォーカス調整のためのXYZステージ(地上側より制御可能)を設置した。また、スレーブアームが把持し使用する実験用の小道具(ナイフ、吸引チューブ、卵容器等)を用意し、道具台上に配置した。

##### (3) モニタ用カメラ

全景をモニタするためのカメラを、実験装置全体の前方および側方から各1台ずつ、グリッパ近傍を詳細にモニタするために、スレーブアームの手首部に小型カメラを搭載した(グリッパの上方および側方から各1台ずつ)。

また、顕微鏡画像モニタのためのカメラを設置した。

##### (4) テレメトリ・コマンド処理装置

培養液の吸引や受精卵吸着のためのポンプに対する地上からのコマンドや、各装置に取りつけた温度センサ等からのテレメトリデータの処理のためのパーソナルコンピュータを設置した。

##### (5) 画像圧縮装置

ベクトル量子化とスカラ量子化の二方式からなるハイブリッド量子化方式による動画像符号化装置<sup>1)</sup>を用い、768 kbps の回線速度で、実験環境のモニタ映像を地上系に伝送した。この場合、生画像の1/130に圧縮されている。

### 3.2 地上系

#### (1) マスタアーム・操作卓

6自由度垂直多関節型マニピュレータの手首部に6軸力センサを取り付け、オペレータ操作用のグリップを付けたものをマスタアームとした。軌道上のスレーブアームと共に、力帰還型<sup>2)</sup>バイラテラルマスタスレーブ制御(BMSC)系を構成した。スレーブアームと同構造のものを使用した。マスタスレーブ間を関節座標で結合するのではなく、計算機を介させた一般化 BMSC 系<sup>3)</sup>とした。グリップ部のボタン操作により、スレーブアームとの結合を解除することができオペレータは操作しやすい位置でマスタアームを操作できる。

さらに、他のマスタ操作機として、力指示型ジョイスティック(自由空間内でのスレーブアーム手先の操作等)、ダイヤル×3(スレーブアーム手先のXYZ方向それぞれの精細位置決め、顕微鏡XYZステージの制御等)を用意した。ジョイスティック、ダイヤルは、機能選択SW、グリップ開閉SW等と共に、オペレータ前方の操作卓上に配置した。(マスタアームと操作卓の配置関係は写真2参照)

#### (2) 環境モニタ TV

3.1(3)に示した各カメラの映像を、オペレータが自由に切り換えできるようにした。また、4分割画面にも切り換え可能で、全景およびグリップ近傍の映像を同時に見ながら、操作できる。写真3に4分割時のモニタ画面を示す。

#### (3) 立体視装置

顕微鏡画像に対して立体視を試みた。立体視装置として、左右眼用のカメラ画像をモニタに交互に切り換え表示し、それと同期した液晶シャッタ眼鏡を着用する方式のものを使用した。このとき映像のちらつき感をなくすため、切り換え周波数を高速化した(120 Hz)のものを使用した。

#### (4) テレメトリ・コマンド処理装置

軌道上のテレメトリ・コマンド処理装置に対する地上でのMMI処理のために、マウスによるメニュー選択とグラフィック画面制御用のパーソナルコンピュータを設置した。写真4にテレメトリ・コマンド指示画面の例を示す。

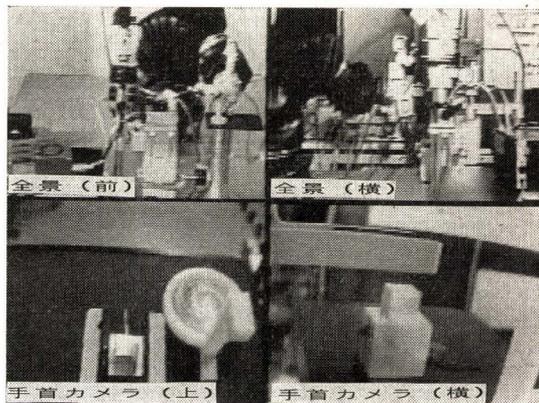


写真3 4分割モニタ画像(ナイフ把持のための接近場面)

## 4. 遠隔操作系の構成

### 4.1 機能構成

図2に遠隔操作系の機能構成を示す。ローカルコンピュータおよびリモートコンピュータはいずれも16ビットパーソナルコンピュータである。地上系のローカルコンピュータは、オペレータインタフェースの制御および通信制御を行う。また、オペレータのマスタスレーブ操作の支援機能として、微小な操作を可能とするためにマスタ操作量を縮小(1/20等)してスレーブに転送する機能、および同時操作自由度を限定する操作自由度の拘束機能を用意した。

マニピュレータコントローラは、手先位置P-関節座標 $\theta$ 間の座標変換と、BMSCのための力制御を行っており、8086+8087(8 MHz)のボードコンピュータと各

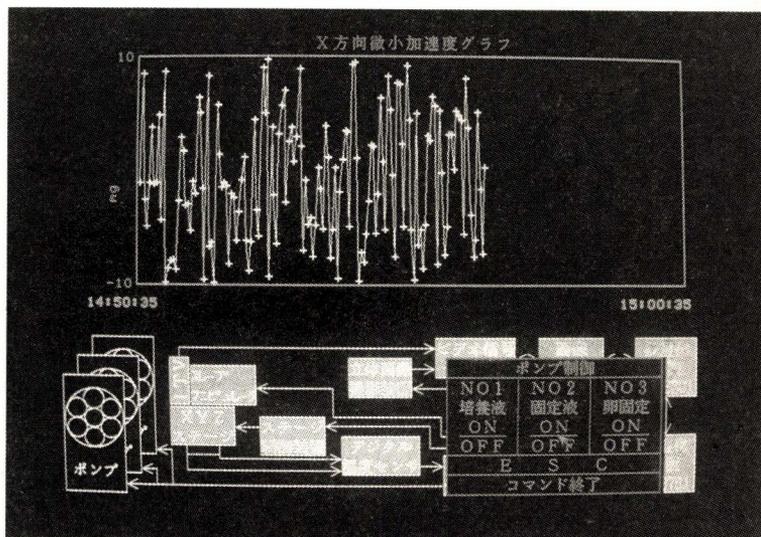


写真4 テレメトリ・コマンド指示画面

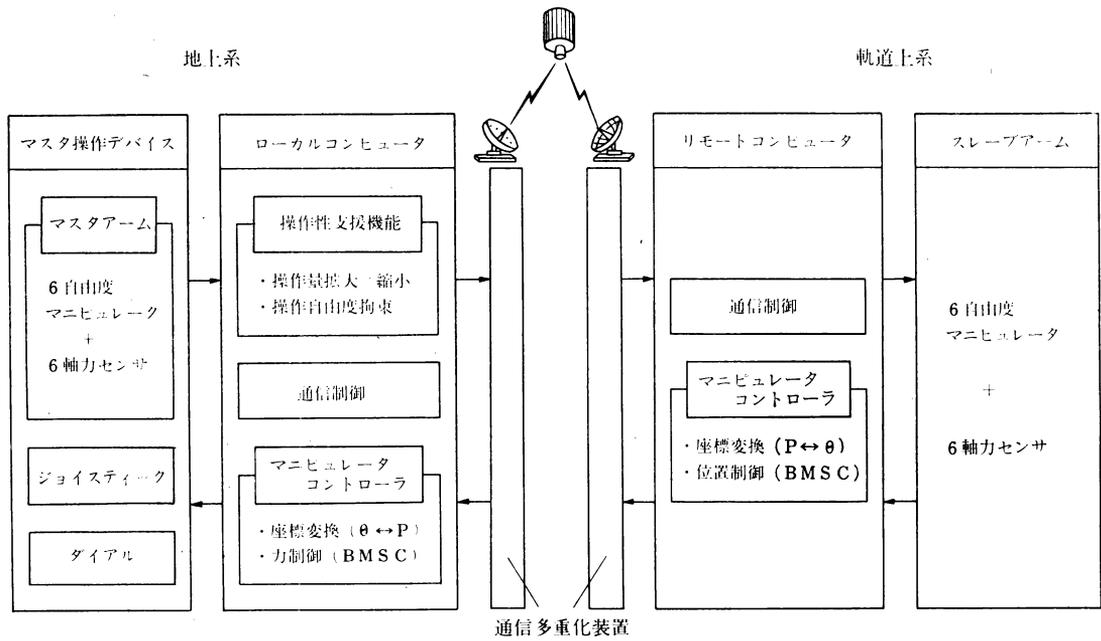
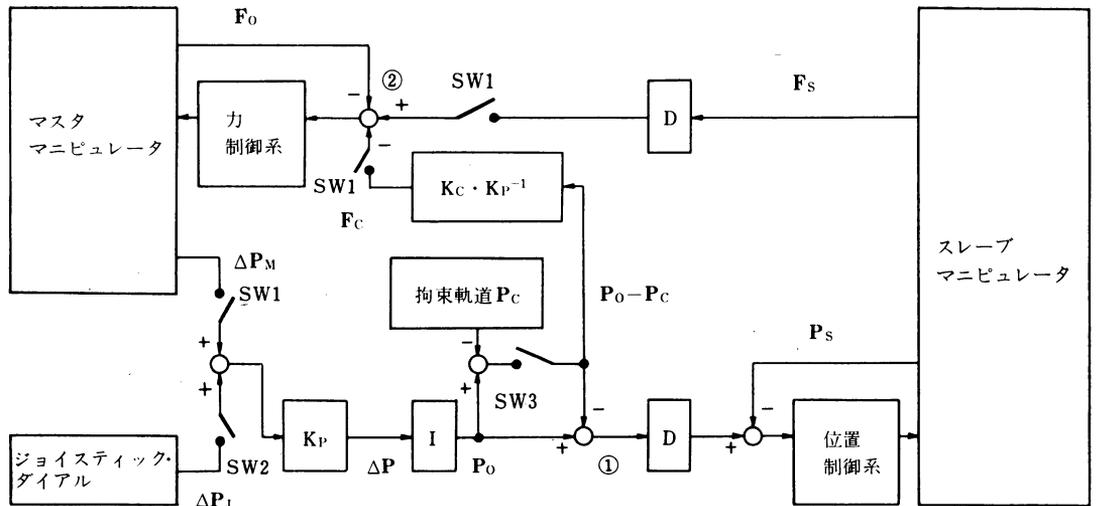


図 2 遠隔操作系の機能構成



- |                                 |                  |                                |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|
| $P_0$ : オペレータ指示位置               | $F_0$ : オペレータ操作力 | $K_P$ : 操作量拡大/縮小ゲイン            |
| $P_s$ : スレーブ位置                  | $F_s$ : スレーブ側発生力 | $K_C$ : 軌道拘束ばね定数               |
| $\Delta P_M$ : マスタアーム移動量        | $F_C$ : 軌道拘束力    | $I$ : 積算要素 ( $\sum \Delta P$ ) |
| $\Delta P_J$ : ジョイスティック・ダイヤル移動量 |                  | SW1 : マスタアーム有効スイッチ             |
| $\Delta P$ : オペレータ指示移動量         |                  | SW2 : ジョイスティック・ダイヤル有効スイッチ      |
|                                 |                  | SW3 : 軌道拘束有効スイッチ               |
|                                 |                  | (いずれの SW も開放状態で零出力の意味)         |
| $P_C(P_0)$ : 拘束軌道関数             |                  |                                |

図 3 BMSC 系の構成

関節制御のためのアナログサーボ回路により構成されている。

軌道上のリモートコンピュータは、主に通信制御を行っており、スレーブアームの動作制御と共に、地上からの指示に応じて、カメラの切り換え制御やグリッパの開閉等の制御を行う。マニピュレータコントローラ部は、ローカルコンピュータ内のものと同様構成である。

遠隔操作時には、地上系と軌道上系はそれぞれ非同期に制御サイクルを実行しており、それぞれの通信制御部は、90 ms 間隔でマニピュレータ手先の位置情報、力情報等を送受信している。

なお今回の実験では、6自由度のマニピュレータを使用した。実験中は、手先の姿勢3自由度を一定方向に拘束し、手先位置3自由度(X, Y, Z)の制御をおこなった。

4.2 BMSC 系の構成

図3に BMSC 系のブロック図を示す。通常の方帰還型 BMSC 系に、操作量の拡大・縮小機能、操作自由度の拘束機能を拡張した構成としている。図中、ブロックDは、地上-軌道上間の通信時間遅れに対応する。また同図は、手先の座標系で描かれている。

SW1(図中3カ所が連動)はマスターアームによる操作を有効とするスイッチで、マスターアームのグリッパ部のボタンにより、開閉できる。(SWは、開放状態で零を出力する。他のSWも同様。)SW1開放状態ではマスターアームの力制御系は独立した系となり、スレーブアームを移動せずにマスターアームのみをオペレータの操作しやすい位置に移動できる。SW2は、同様にジョイスティック、ダイヤルを有効とするスイッチである。

$K_p$  は操作量の拡大・縮小ゲイン(対角行列)で、今回の実験では、1/1, 1/10, 1/20 をオペレータが操作時に選択できるようにした。Iは積算動作で、遠隔操作開始時にその時のスレーブアームの位置  $P_{s0}$  で初期化し、 $\sum \Delta P + P_{s0}$  の演算を行う。

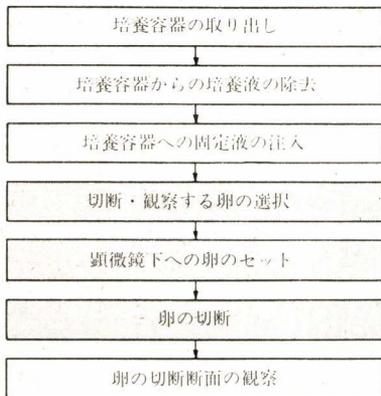


図4 模擬実験の流れ

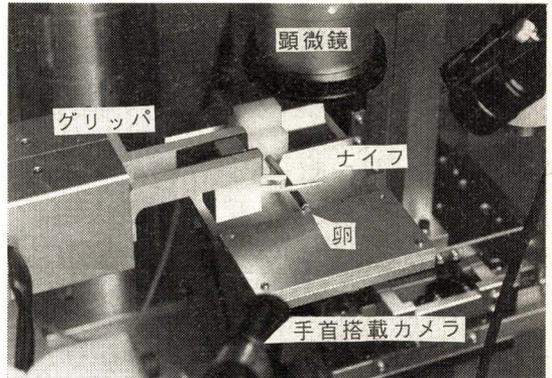


写真5 受精卵の切断

拘束軌道  $P_c (P_0)$  は、今回は手先の座標 X, Y, Z のそれぞれを一定値に拘束するもの(各座標値一定に対応する拘束面)の組み合わせとした。例えば、

$$P_c = (X_c, Y_0, Z_0) : X \text{ 座標のみ拘束}$$

$$P_c = (X_0, Y_c, Z_0) : Y \text{ 座標のみ拘束}$$

$$P_c = (X_c, Y_c, Z_0) : X, Y, Z \text{ 座標拘束}$$

等である。ただし、 $X_c$  等は拘束座標値、 $Y_0$  等は入力  $P_0$  の要素である。拘束機能を選択した時点で、 $X_c$  等の拘束座標値はその時のスレーブアーム位置  $P_{s0} (X_{s0}$  等) で初期化され、SW3が閉じられる。

$F_c$  は軌道拘束力で、拘束面からの距離に比例した値として加算点②を通じてオペレータに与えられる。

加算点①は、オペレータの指示位置  $P_0$  の拘束面からの誤差を差し引いて、スレーブ手先を正確に拘束面に拘束する働きを持つ。

5. 実験シナリオ

模擬実験の具体的な実験テーマとして、ライフサイエンスの分野から「カエルの固体発生に対する微小重力の影響」を選定した。想定した実験の流れを図4に示す。

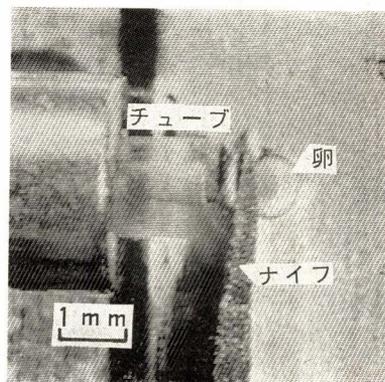


写真6 受精卵の切断(顕微鏡画像)

図4中、部分を今回行った。オペレータによる遠隔実験の実行では、観察する受精卵(直径1mm)を1つ選択して、顕微鏡下にセットし、外科手術用メスにて半分切断して、断面を観察するという事を想定した。

具体的には、以下の手順によった。

- ①培養容器の顕微鏡下へのセット。
- ②切断・観察する卵の選択。
  - ・卵吸着用チューブの把持(道具台上)。
  - ・卵吸着用チューブの顕微鏡下への移動。
  - ・卵吸着用チューブの培養容器への挿入、目標卵への位置決め、吸着用ポンプON(テレメトリ・コマンド)、吸着(以上、顕微鏡下)。
- ③顕微鏡下への卵のセット。
  - ・卵吸着用チューブ(先端に卵吸着済)の顕微鏡下へのセット。
- ④卵の切断。
  - ・切断用ナイフの把持(道具台上)。
  - ・切断用ナイフの顕微鏡への移動。
  - ・卵上空でのナイフの位置決め(顕微鏡下)。
  - ・卵切断(顕微鏡下)。

なお、顕微鏡下での作業時に操作の縮小機能、また、卵切断時に卵切断面を保持するために、卵上空での位置決め終了後切断終了まで、操作自由度の拘束機能を使用した。

## 6. 実験結果

0.5秒の通信時間遅れの下で、マニピュレータの遠隔操作により、直径1mmの受精卵の吸着、切断等の作業が実行できた。(写真5、写真6に受精卵の切断場面を示す。)

0.5秒の時間遅れでは予測操作が充分可能であり、最初は作業実行速度が遅くなるが、操作中にオペレータは時間遅れに適応できた。このとき操作感は時間遅れの無い場合に近く、MOVE & WAIT動作は顕著には見られなかった。また、操作の縮小や拘束等のオペレータ支援機能は、卵の切断時等に非常に有効であった。

しかし、すべてを遠隔操作により行ったので、実験の効率の点では問題があり、基本作業の自動化、ライブラリ化等を考慮する必要がある。

一方、軌道上モニタ用の画像に対して、先に述べたように圧縮処理を施したが、今回の実験では、オペレータにとって十分な画質であった。

今回の実験では、実験環境呈示のために全景画像2枚、グリップ周辺画像2枚の計4枚を使用した。環境の完全な把握は困難であり、周辺の障害物との干渉の不安が操作速度を限定し、緊張感を高める大きな原因となっていた。このような直視できない環境にあるマニピュレータの遠隔操作の場合、環境呈示のための最適なカメラの数や配置を検討するとともに、カメラの死角となる部分のシミュレーショングラフィックによる呈示支援<sup>9)</sup>やシステムによる干渉監視機能等が重要と考えられる。

## 7. 今後の課題

本実験実施時の見学参加者(宇宙関連機関、大学等から50名程度)に、終了後、記入して頂いたアンケート等の結果、テレサイエンスとして解決していかなければならない技術的課題として、次のようなものが明らかとなった。

- ・時間遅れに対する予測制御支援
- ・実験装置の自動化と地上からの遠隔制御との最適な役割分担
- ・遠隔操作に関するテレメトリとコマンドとの対応付けを基にした学習機能
- ・高精細画像(HDTV)の圧縮伝送
- ・テレサイエンス機器の小型化、軽量化

☆ ☆

当日、見学いただいた参加者の方々には、概して「テレサイエンスのイメージの明確化に役立った」と御好評をいただいた。この場をお借りして、御協力いただいた方々に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 伊藤ほか：ハイブリッド量子化を用いた画像コーデックの開発、昭和63年信学春秋全大、D-82(1988)。
- 2) 中野：「ロボット工学入門」、オーム社、1983。
- 3) A. K. Bejczy, "CONTROL OF REMOTE MANIPULATORS", HANDBOOK OF INDUSTRIAL ROBOTICS, chapter 17, JOHN WILEY & SONS, 1985。
- 4) 内山ほか：多腕宇宙ロボットシミュレータ、ロボティクス・自動化システムシンポジウム(SICE), pp. 69-72, 1988。



渡辺一郎

(Ichiro WATANABE)

昭和62年東京工業大学大学院修士課程修了。同年、(株)富士通研究所に入社。以来、宇宙用ロボットの開発に従事。昭和63年度精密工学会論文賞受賞。現在、宇宙メカトロニクス研究部第1研究室所属、精密工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



内山 隆

(Takashi UCHIYAMA)

昭和48年東京工業大学大学院修士課程終了。同年、(株)富士通研究所に入社。ロボットの制御、視覚システム、プランニングシステムの研究を行うとともに、極限作業ロボット、宇宙用ロボットの開発に従事。現在、宇宙メカトロニクス研究部部長代理、計測自動制御学会、精密工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)