

宇宙マニピュレータテストベッド SMART-I: システム構成と性能評価

(平成 5 年11月30日 原稿受付)

設計生産工学科	稲田智久
	葉山鉄夫
	加藤了三
久留米工業大学	山本俊彦
制御システム工学科	大川不二夫

Space Manipulator Robot Testbed SMART-I: System Structure and Performance Estimation

By Tomohisa INADA
Tetsuo HAYAMA
Ryozo KATOH
Toshihiko YAMAMOTO
Fujio OHKAWA

Abstract

Various type of space robots are required for the space development. Free-flying robot (FFR) having manipulators is useful for constructing, inspecting, and repairing space structures, because it is too dangerous for human being to operate these works in space. These motivations are encouraging theoretical researches of FFR, especially studies on the control of FFR. However, it is also important to verify the theoretical analysis results experimentally.

Authors developed a space manipulator robot testbed SMART-I. This report deals with its design concept, system structure and performance estimation. It was experimentally confirmed that this testbed has the convenient characteristics, except an influence by air-tube connecting with a FFR system and the outside world.

1. まえがき

宇宙開発における船外活動の必要性はますます増加しつつあるが、その環境は(1)真空状態である、(2)多量の放射線が存在する、あるいは(3)過酷な熱環境である、など人間にとって危険を伴うものである。このような理由から、人間に代って作業を行うマニピュレータを搭載したロボットの重要性は広く認識されている⁽¹⁾。

無重力環境下でロボットを制御する場合、地球上の場

合に比べて大きく異なる点のひとつに、ロボットが空間に浮遊している点がある。このためフリーフライングロボット (Free-Flying Robot, 以後 FFR と略す) に搭載されているマニピュレータを動作させると、FFR 本体の位置と姿勢はマニピュレータからの反力により変動するため、地上用マニピュレータと同じ制御方法を用いることはできない。この問題に対処するため、FFR に取り付けられたマニピュレータの制御については、いくつかの方法が提案されているが、その基本的な考え方は次

の2つに分類される。その1つはマニピュレータだけではなく、ロボット本体もスラスト等を用いて積極的に制御する方法である⁽²⁾⁽³⁾。あとひとつはロボット本体の姿勢には関与せずマニピュレータのみ制御する方法である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。吉田らは後者の立場から、これらの問題に対処するための手段として一般化ヤコビ行列を導入し、これを用いた制御法を提案している⁽⁵⁾。

一方、理論解析で得られた結果の実用性を検討するためには、解析や計算機シミュレーションにとどまらず、実機での検討が重要である。この立場からすでにいくつかのシミュレータが試作されている⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。いずれのシミュレータにおいても、微小重力環境の実現に工夫が凝らされているが、現在存在するシミュレータに採用されている主な方式は以下のとおりである。

①空気浮上により擬似無重力状態を実現する方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾
(2次元運動に限定される)

②ソフト的に重力を補償する方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾

①の方法は、ロボットの運動が平面に限定される欠点があるが、製作が簡単であるという長所がある。②の方法は3次元運動が可能であるという長所がある反面、実機のモデルをソフト的にどの程度正確に作成できるか疑問が残るとともに、装置が大がかりになるという欠点がある。

筆者らは、宇宙用マニピュレータの制御については、ロボット本体の姿勢には関与せずマニピュレータのみ制御するという立場に立ち、宇宙マニピュレータにとって重要な問題として、マニピュレータの操作対象物体への接近問題、対象物体との衝突問題および物体把持後の操り問題の3つを取り上げ、それぞれについて理論的検討を行ってきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本報告では、宇宙用マニピュレータの諸問題の解析結果の実用性を確認するために開発したテストベッドSMART-I (Space Manipulator Robot Testbed-I) の基本構成と性能評価結果を報告する⁽¹³⁾。

2. テストベッド設計コンセプト

テストベッド設計にあたっては、FFRの活動環境が微小重力環境である、つまり物体はすべて浮遊状態にあることによる効果を検討することを主眼とし、以下のコンセプトで設計した。

- (1)微小重力環境を模擬できる装置とする。
- (2)ロボットは半自立型とする。

(3)双腕マニピュレータを有するロボットとする。

(1)の実現のため、圧縮空気をロボットから定盤に噴出し、ロボットを浮遊させる方式を採用した。この方式により実現できる微小重力環境は水平2次元平面内の運動に限定されるが、良好な微小重力環境が期待できる。(2)は宇宙ロボットの活動状況を考慮してのコンセプトであり、ロボット制御のために必要な装置はすべてロボット上に搭載することとした。ただし、圧縮空気を供給するエアースホースだけが外部環境とつながっている。FFRに期待されている作業内容を考慮すれば、複数腕のマニピュレータを有することが必要である。(3)はこの条件を満たす最も簡単なものとして採用した。なお、スラスト、リアクションホイールのようなロボット本体の位置や姿勢角を制御するための装置は搭載されていない。

3. システム構成

開発したテストベッドのシステム構成を図1に示す。テストベッドはFFRシステムと座標計測・無線通信システムの2つのサブシステムから構成されている。

FFRシステムの外観を図2に示す。FFRシステムは本体部に2本の2リンク回転型マニピュレータを有する双腕型FFRで、次の要素から構成されている。

- ・各関節に設置された減速器付きDCサーボモータ (4個、定格出力20W、減速比1/100)

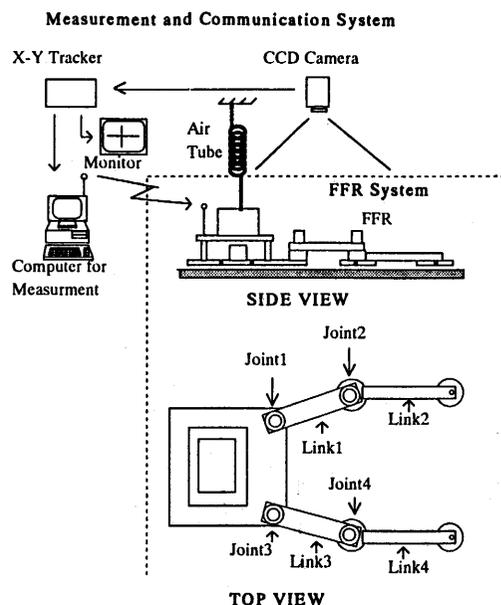


図1 システム構成

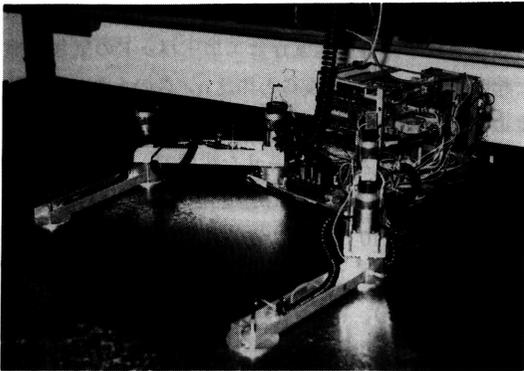


図2 システム外観

- ・各関節に設置されたインクリメント型エンコーダ（4個，500P/R）
- ・PWM方式サーボモータドライバ（4ch.）
- ・制御用ボードコンピュータ（CPU：80386SX-16MHz）
- ・RAMボード（1 Mbyte）
- ・カウンタボード
- ・D/Aコンバータボード（4ch.）
- ・電源回路

一方，座標計測・無線通信システムは，ロボットの慣性座標系における位置を計測する座標計測システムと，計測結果をロボットに伝送する情報通信システムから構成されている。座標計測システムはロボット本体に搭載するのが現実的であるが，座標計測システムのコードがロボットの運動を妨害する，FFRシステムが大きくなりすぎるという2つの理由で，本システムではこの構成としている。

図3にシステムのブロック図を示す。各サブシステムでは次の処理を行う。座標計測システムでは，FFR本体，リンク1・2の関節，エンドエフェクタにそれぞれ

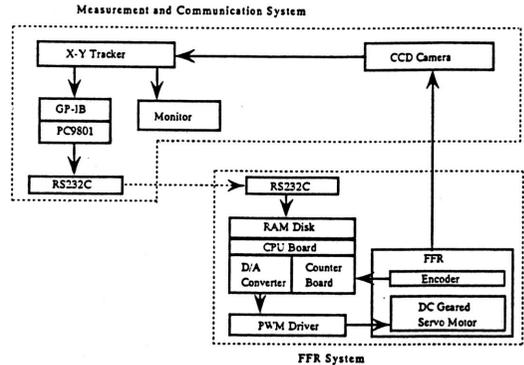


図3 テストベッドシステムのブロック図

取り付けられた4個のLEDの位置情報を，CCDカメラを介して2次元運動計測装置（X-Y Tracker）に取り込み，GP-IBインターフェイスを介して計測用計算機（NEC PC9801RX）に転送し，慣性座標系におけるマニピュレータの手先位置およびFFR本体の姿勢角を求める。さらに，この情報は情報通信システムにより，RS-232Cインターフェイスを介してFFRシステムの制御用ボードコンピュータに無線で伝送される。FFRシステムではエンコーダで計測した関節角度情報と座標計測・通信システムから送信された位置データをもとに，FFRに搭載されている計算機により，関節角速度または角度の目標値を求める。さらに，求められた目標値と計測値から制御入力決定され，D/Aコンバータを通してPWM方式サーボモータドライバに伝達され，DCサーボモータが駆動される。

2次元運動計測装置の処理能力の制約のため，目標値作成周期 ΔT は最小で100msで，かなり長い。そこで，マニピュレータの滑らかな運動を実現するために，図4

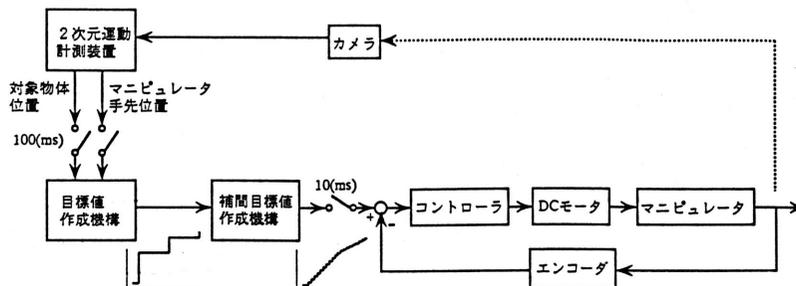


図4 制御系ブロック線図

に示す制御系を構成した。この制御系では100 msごとに作成される目標値に対して、その目標値を10等分し、10 msごとに目標値を変化させる。システムはその目標値に追従する。

4. テストベッドの性能評価

4.1 FFRシステムの仕様

試作したFFRシステムの機械的仕様を表1に示す。関節およびリンクの番号は図5に示すとおりである。質量中心位置は、FFR本体の場合関節1から質量中心までの長さ、リンクの場合は質量中心から同じ番号の関節までの長さである。各要素の寸法、質量、質量中心位置は直接計測することにより求めた。慣性モーメントは、各関節で構成されているサーボ系のステップ応答波形から減衰率と固有振動数を求めることにより求めた。

4.2 擬似無重力特性

本実験装置と同じ方式の装置を開発している吉田らは、

	Size (cm×cm)	Center of Mass a_i (cm)	Mass (kg)	Moment of Inertia (kg cm ²)
Body	30.30	20.8	4.01	2691.9
Link1	25.6	12.4	1.33	1336.5
Link2	25.4	8.6	0.50	132.4
Link3	25.6	12.4	1.33	1345.1
Link4	25.4	8.6	0.50	182.9

表1 FFRの物理パラメータ

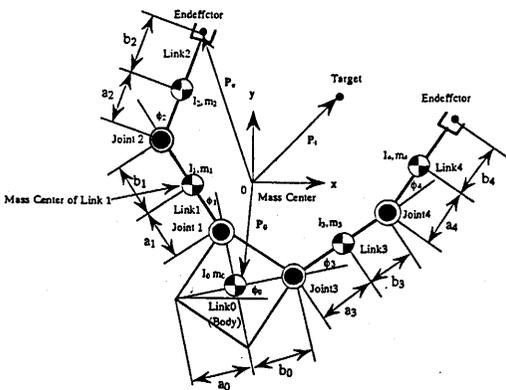


図5 宇宙マニピュレータの2次元モデル

FFRシステムが外部環境と独立している場合、微小重力環境を乱す外乱加速度 α はエアパッドの気体摩擦に起因し、重力の加速度 G との比 α/G の大きさは気体摩擦係数と同程度であると報告している⁽¹⁴⁾。そこで、まずFFRシステムを浮上させた状態で、床面(定盤)との摩擦係数を高精度の水準器を用いて調べた。その結果、摩擦係数は 10^{-4} 程度であった。スペースシャトルの場合平均 $10^{-4}G$ (数日間)、航空機の弾道飛行では $10^{-2}G$ (数十秒間)、落下塔の場合は $10^{-6}G$ (数秒間)との報告結果⁽¹⁵⁾と比べても十分高精度で、床面との摩擦については十分な性能があるといえる。なお、供給空気圧 6.0 kg/cm^2 の圧縮空気をFFR側から噴出した場合、浮上するロボットの高さは、約 0.1 mm であった。

4.3 サーボ特性

各関節で構成されているサーボ系のステップ応答特性を調べた。コントローラとしてはP型を用い、そのパラメータは応答が臨界制動となるように決定した。また、静止摩擦によるモータの不感帯を補償するために、モータへの指令電圧を次のように補正した。

$$v^* = v + \Delta v$$

ここで、 v, v^* はそれぞれ補正前および補正後のモータへの指令電圧である。補正量 Δv は

$$\Delta v = \begin{cases} \alpha_p & \text{for } v_{ref} > 0 \text{ and } v = 0 \\ 0 & \text{for } v_{ref} = 0 \text{ and } v = 0 \\ -\alpha_n & \text{for } v_{ref} < 0 \text{ and } v = 0 \end{cases}$$

により決定することとし、パラメータ α の値は実験により求めた。例えば、本装置のリンク1の場合、 $\alpha_p = 1.15, \alpha_n = 1.15\text{ V}$ である。

リンク1のステップ応答波形を図6に示す。この図より良好なサーボ系が構成できていると考えられる。なお、

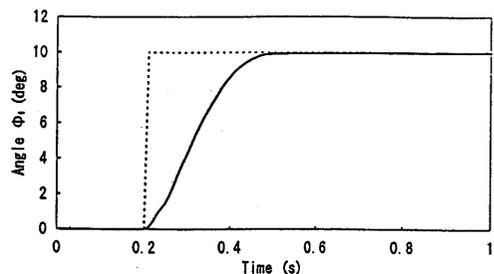


図6 ステップ応答例(リンク1)

いずれの関節における実験においても図6と同様の結果が得られた。

4.4 簡単な実験例（浮遊静止物体捕捉実験）

エアチューブによる影響を調べるために、一般化ヤコビ行列を用いた分解速度制御則⁽⁵⁾によるマニピュレータの手先軌道制御実験を行った。ただし、実験はマニピュレータを一本にして行った。この実験はFFRによる浮遊静止物体の捕捉作業を模擬したものである。実験方法および実験条件を以下に示す。

4.4.1 分解速度制御法

宇宙用マニピュレータのマニピュレータのエンドエフェクタの速度 \dot{P}_e と関節角速度 $\dot{\phi}=(\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2)^T$ との関係は、

$$\dot{P}_e = J^* \dot{\phi} \quad (1)$$

$$J^* = J_M - J_S I_{S-1} I_M \quad (2)$$

で表現できることが知られている⁽⁵⁾。ここで、 J_S 、 J_M はシステムの重心位置が保存されることを考慮したときのヤコビ行列で、 I_S 、 I_M はそれぞれ角速度 $\dot{\phi}_i$ に関する慣性モーメントを表す。図5に示す平面モデルにおいて、マニピュレータが一本の場合、これらは次のようになる。

$$J_S = \begin{bmatrix} -k_0 \sin \theta_0 - k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2 \\ k_0 \cos \theta_0 + k_1 \cos \theta_1 - k_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$J_M = \begin{bmatrix} -k_1 \sin \theta_1 - k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2 \\ k_1 \cos \theta_1 + k_2 \cos \theta_2 & k_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$I_S = I_0$$

$$I_M = [I_1, I_2]$$

I_i ：ロボット構成リンクの質量中心回りの慣性モーメント ($i=0, 1, 2$)

$$k_0 = m_0 b_0 / M$$

$$k_1 = \{m_0 a_1 + (m_0 + m_1) b_0\} / M$$

$$k_2 = (m_0 + m_1) a_2 / M + b_2$$

$$M = m_0 + m_1 + m_2$$

$$\theta_i = \sum_{k=0}^i \phi_k \quad (i=0, 1, 2)$$

したがって、一般化ヤコビ行列 J^* が正則であれば、手先目標速度 \dot{P}_e を与えると、

$$\dot{\phi} = J^{*-1} \dot{P}_e \quad (3)$$

により、関節角速度の目標値が求まる。さらに、これを微小時間 ΔT （目標値作成周期）での近似式に変換すると、

$$\Delta \phi = J^{*-1} \Delta P_e \quad (4)$$

となり、関節角度の目標値が求まる。

4.4.2 手先の目標速度の設定法

マニピュレータ手先の目標速度は、

$$\dot{P}_{er} = \frac{P_i - P_e}{\Delta T}$$

により求める。 P_i はターゲットの位置ベクトル、 P_e はエンドエフェクタの位置ベクトルである。ただし、求めた目標速度 \dot{P}_{er} が手先の最大速度 $\dot{P}_{e \max}$ を越える場合、あるいは式(3)により求めた関節速度 $\dot{\phi}_i$ がその最大関節速度 $\dot{\phi}_{i \max}$ を越える場合は、次のような修正を行う。

- ・目標速度 \dot{P}_{er} が手先の最大速度 $\dot{P}_{e \max}$ を越える場合
目標速度 \dot{P}_{er} を手先の最大速度 $\dot{P}_{e \max}$ に設定する。
- ・目標関節速度 $\dot{\phi}_i$ がその最大関節速度 $\dot{\phi}_{i \max}$ を越える場合
目標関節速度 $\dot{\phi}_i$ が最大関節速度 $\dot{\phi}_{i \max}$ となるように目標速度 \dot{P}_{er} をスケールリングする。

4.4.3 実験条件

実験は次の条件の下で行った。

- (1) エンドエフェクタの目標軌道は初期位置と対象物体を結ぶ直接軌道とする。
- (2) モータへの目標値は式(4)で求まる関節角度とする。
- (3) コントローラはP型とする。ただし、そのパラメータは、応答が臨界制動となるように決定した。
- (4) FFRの初期姿勢：
 - $\phi_0 = 1.5 \text{ deg}$, $\phi_1 = -36.5 \text{ deg}$,
 - $\phi_2 = 89.0 \text{ deg}$
- (5) 目標角度生成周期：100ms
- (6) サーボ系制御周期：10ms

4.4.3 実験結果

実験結果を図7に示す。マニピュレータの手先は目標軌道どおり直線軌道を描いており、制御実験は成功している。図8は計算機シミュレーションにより得られた宇宙ロボットの運動の様子を示している。両者の運動は基本的には同様の運動をしているが、FFR本体の回転角度に差異がみられる。図9はFFR本体の回転運動の様子を、理論値と実験値とで比較したものである。図中の実線は理論値、■印は実験値を200msごとにプロットしたものである。実験値と理論値は運動の初期時点と最終時点においてはかなり一致しているが、中間部での差異が大きい。これはエアチューブによる影響、つまり図

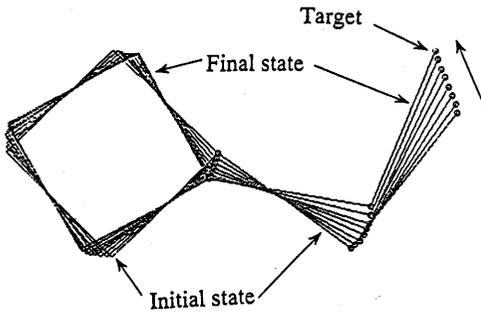


図7 実験結果の一例

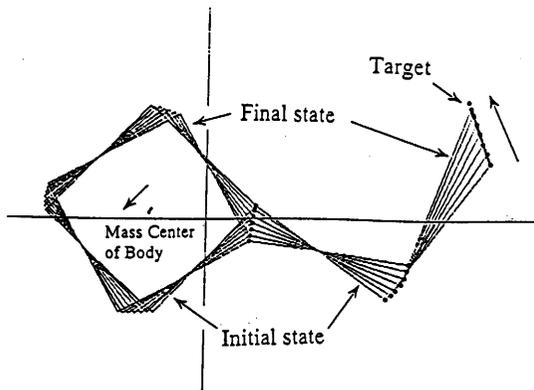


図8 シミュレーション結果

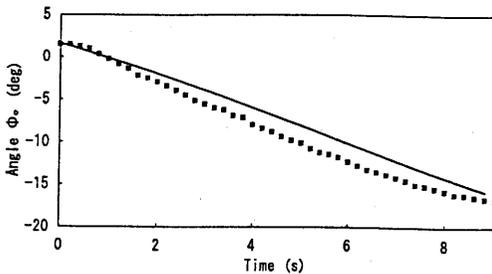


図9 ロボット本体回転角の比較

9に示すような運動中におけるロボット本体の回転運動および並進運動をエアチューブが阻止することによるものと思われる。

6. あとがき

本報告では、試作したテストベッドの基本構成と性能評価を行い、シミュレータとして使用可能性を検討した。その結果、おおむね良好な性能を有することがわかったが、シミュレータとしての性能をさらに向上させるためにはエアチューブによるFFRシステムへの影響を除去する必要がある、という結論を得た。この対策として、次の2つが考えられる。

- (1) エアチューブを制御する。
- (2) FFRシステムにエアタンクを搭載する。

今後、(1)の方法を検討したい。

本テストベッド開発は(株)東芝との共同研究の一環として行われました。また、平成4年度教育研究特別経費の援助を受けました。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- (1) Y. Xu and T. Kanade, Space Robotics: Dynamics and Control, Kluwer Academic Publisher, 1993.
- (2) R. W. Longman, R. E. Lindberg and M. F. Zedd, Satellite-Mounted Robot Manipulators-New Kinematics and Reaction Moment Compensation, Int. J. of Robotics Research, Vol. 6, No. 3, pp. 87-103.
- (3) 小松ほか, 自律型宇宙ロボット地上実験装置 ASROT の開発, 日本ロボット学会誌, 第8巻, 第6号, pp.712-720, 1990.
- (4) Z. Vafa and S. Dubowsky, On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 579-585, 1987.
- (5) Y. Umetani and K. Yoshida, Experimental Study on Two Dimensional Free-Flying Robot Satellite Model, Proc. of NASA Conf. on Space Telerobotics, Vol. 5, pp. 215-224, 1989.
- (6) H. L. Alexandar and R. H. Cannon, Jr., Experiments on the Control of a Satellite Manipulator, Proc. of 1987 IEEE American Control Conference, 1987.
- (7) Y. Murotu et al., Parameter Identification of Unknown Object Handled by Free-Flying Space Robot, Proc. of AIAA Guidance, Navigation & Control Conf. (AIAA 92-4307), 1992.
- (8) 下地ほか, 6軸サーボ機構を用いた宇宙ロボット用シミュレータシステム, 日本ロボット学会誌, 第8巻, 第2号, pp.144-151, 1990.
- (9) 渡辺ほか, 宇宙ロボット用テストベッドシステム (ASTRA), 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp.215-220, 1993.
- (10) 加藤ほか, フリーフライングロボットにおける搭載アンテナとマニピュレータの実用的同時制御法, 日本機械学会誌

- C編, 第59巻, 第565号, pp.2758-2764, 1993。
- (11) R. Katoh et al., A Control Method of Space Manipulator Mounted on Free-Flying Robot by Using Parameter Identification, Proc. of AVIC'93, pp. 1178-1183, 1993.
 - (12) 加藤ほか, エネルギーに注目したフリーフライングロボットの長時間軌道計画, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.53-54, 1993。
 - (13) 加藤ほか, フリーフライングロボットシミュレータの開発, 日本機械学会九州支部・中国四国支部合同企画鹿児島地方講演会予稿集, pp.183-184, 1993。
 - (14) 梅谷ら, 自由浮遊する宇宙用テレロボット・モデルによる対象物の捕捉制御実験, 日本ロボット学会誌, 第7巻, 第6号, pp.725-731, 1989。
 - (15) 石田, 小型ロケットの微小重力実験計画について, 第6回宇宙ステーション利用計画ワークショップ予稿集, pp.195-205, 1987。