# 宇宙マニピュレータテストベッドSMART－II による手先軌道適応制御実験

（平成8年11月29日　原稿受付）

設計生産工学科　稲田智久
中塚敬一
制御システム工学科　小林順
大川不二夫
設計生産工学科　相良慎一
加藤了三

# Trajectory Control Experiments of Space Manipulator Using its Testbed SMART－II

By Tomohisa INADA
Keiichi NAKATSUKA
Jun KOBAYASHI
Fujio OHKAWA
Shinichi SAGARA
Ryozo KATOH

**Abstract**

This report deals with performances of a testbed (Space Manipulator Robot Testbed II：SMART-II) developed and experimental results of end-effector's trajectory control of space robot manipulator by digital adaptive control using the testbed. In this testbed, D.C. motors with backlashless reduction gears, namely harmonic gears, were used as actuators driving manipulators, while the testbed was developed based on the same concept as that of a testbed SMART-Ｉ. Trajectorycontrol experiments of space robot manipulator were performed using digital adaptive control method developed, and the usefulness of the testbed and the validity of the control method were successfully confirmed by the experiments.

## 1．まえがき

宇宙開発における様々なタスクを，人間に代わって行うフリーフライングロボット（Free-Flying Robot：FFR）が提案されている[1]。FFRの制御法についてはすでに多くの方法が提案されている[2][3]が，筆者らも種々の制御法を提案[4][5]する一方，これら制御則の妥当性を検討するためのテストベッド（宇宙マニピュレータテストベッドSMART-Ｉ）を開発し，そのシステム構成と性能評価について報告している[6]。

FFRの制御法としては，バーチャルマニピュレータを用いる方法[2]，一般化ヤコビ行列を用いた分解速度制御法[3]，分解加速度制御法[7]などが提案されている。しかし，いずれの手法においても，その制御則が有効であるためには，マニピュレータの慣性モーメントや質量などに代表される物理パラメータが既知であることが必要である。したがって，例えばマニピュレータが未知浮遊物体を捕捉した場合，ＦＦＲのすべてのシステムパラメータが変化し，制御性能の劣化を招くこととなる。この問題に対処する有効な方法の１つは，ロボットシステムのパラメータ推定を行い，この情報をもとに制御を行う方法である。吉田ら[8]はこの推定問題を理論的に検討し，実験的にも高精度で慣性パラメータが同定可能であることを示している。Murotsu

ら[7]は，パラメータ同定機構を持つ分解加速度制御により，ロボットの制御が行えることを示している。またKatohら[5]は2種類のパラメータ推定法と分解速度法を併用する方法を，岩田ら[9]はモデル規範形適応制御を用い，計算機シミュレーションにより良好な制御が可能であることを示している。しかし，従来の研究はいずれも連続時間系での議論であり，計測値の離散化誤差や演算時間によるむだ時間の影響は検討されていない。ロボットの制御がディジタル計算機を用いた制御であることを考慮すると，これらの議論では不十分であるとの認識から,筆者らは,この問題にディジタル適応制御法を用いることを提案している[10][11]。この方法によれば計測値として，関節角速度等の速度情報が不必要であるという利点も生まれる。

本報告では，SMART-Ⅰを改良したSMART-Ⅱを用い，未知浮遊物体捕捉後のＦＦＲの手先軌道制御実験を，提案している適応制御則を適用して行い，テストベッドSMART-Ⅱが有用であること，ならびに提案している適応制御法が有効であることを実験的に示す。

## 2．ＦＦＲモデルと一般化ヤコビ行列

2リンクマニピュレータを有するＦＦＲの2次元モデルを図1に示す。ベースをリンク0とし，マニピュレータを構成するリンクはロボット本体側から順にリンク1，2とする。また，リンクｊとリンクｊ＋1の間の関節をジョイントｊ＋1（ｊ＝0，1）とする。アクチュエータは，関節1と2に装備される。このモデルに関する仮定および記号は次のとおりである。

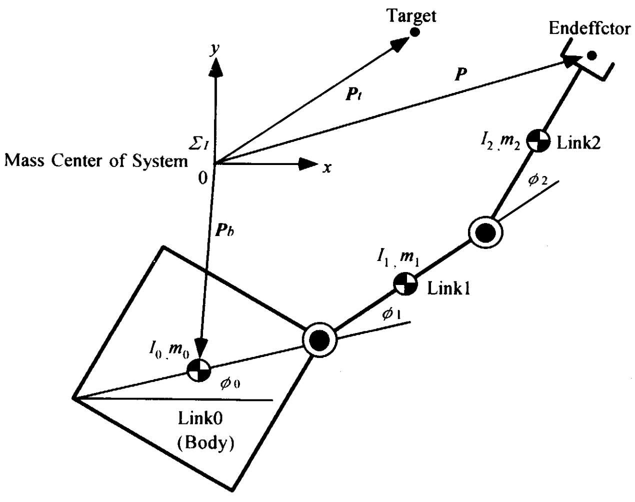


図1　ＦＦＲの2次元モデル

＜仮定＞

1．ＦＦＲを構成するリンクは全て剛体とする。
2．ＦＦＲに対して外力は作用しない。
3．ＦＦＲは初期状態において静止しているものとする。

＜記号＞

$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$：慣性座標系に対するマニピュレータの手先位置ベクトル

$\boldsymbol{r}_i=\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$：慣性座標系に対するリンク $i$ の質量中心位置ベクトル

$\boldsymbol{\phi}_m=\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$：関数変数ベクトル

$\boldsymbol{\phi}_i$　：関節角（$i=0$，1）

$\boldsymbol{a}_j \in \boldsymbol{R}^2$：ジョイント $j$ から，リンク $j$ の質量中心を指すベクトル

$\boldsymbol{a}_j \in \boldsymbol{R}^2$：リンク $j$ の質量中心から，ジョイント $j+1$（またはエンドエフェクタ）を指すベクトル

$\boldsymbol{l}_j \in \boldsymbol{R}^2$：ジョイント $j$ から，ジョイント $j+1$（またはエンドエフェクタ）を指すベクトル

$w$　：ＦＦＲの全質量

$m_i$　：リンク $i$ の質量

$I_i$　：リンク $i$ の質量中心まわりの慣性モーメント

図1のマニピュレータ手先速度 $\dot{\boldsymbol{P}}$ と関節角速度 $\dot{\boldsymbol{\phi}}_m$ との間には次の関係式が成り立つことが知られている[3]。

$$\dot{\boldsymbol{P}}=\boldsymbol{J}^*\boldsymbol{\phi}_m \tag{1}$$

ここで

$$\boldsymbol{J}^*=\boldsymbol{J}_m-\boldsymbol{J}_s I_s^{-1}\boldsymbol{I}_m^{\mathrm{T}}$$

$I_s$　：衛星本体の慣性モーメント

$\boldsymbol{I}_m$　：マニピュレータの慣性モーメント

$\boldsymbol{J}_s, \boldsymbol{J}_m$：各リンクの質量比を含んだ拡張ヤコビ行列であり、$\boldsymbol{J}^*$ はＦＦＲの一般化ヤコビ行列と呼ばれている。なお、$I_s, \boldsymbol{I}_m, \boldsymbol{J}_s, \boldsymbol{J}_m$ は次のようになる。

$$I_s=H_0+H_1+H_2+2(C_{01}+C_{12}+C_{02})$$

$$\boldsymbol{I}_m=\begin{bmatrix} H_1+H_2+C_{01}+2C_{12}+C_{02} \\ H_2+C_{12}+C_{02} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{J}_s=\begin{bmatrix} -S_0-S_1-S_2 \\ C_0+C_1+C_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{J}_m=\begin{bmatrix} -S_1-S_2, -S_2 \\ C_1+C_2, C_2 \end{bmatrix}$$

$$H_0=I_0+M_0 b_0^2$$

$$H_1=I_1+M_0 a_1^2+M_2 b_1^2+2M_1 a_1 b_1$$

$$H_2=I_2+M_2 b_2^2$$

$$C_{01}=(M_0 b_0 a_1+M_1 b_0 b_1)\cos\boldsymbol{\phi}_1$$

$$C_{12}=(M_1 a_1 a_2+M_2 b_1 a_2)\cos\phi_2$$
$$C_{02}=M_1 b_0 a_2\cos(\phi_1+\phi_2)$$
$$M_0=m_0(m_1+m_2)/w$$
$$M_1=m_0 m_2/w$$
$$M_2=(m_0+m_1)m_2/w$$
$$S_0=m_0 b_0\sin\theta_0/w$$
$$S_1=(m_0 l_1+m_1 b_1)\sin\theta_1/w$$
$$S_2=\{(m_0+m_1)l_2+m_2 b_2)\}\sin\theta_2/w$$
$$C_0=m_0 b_0\sin\theta_0/w$$
$$C_1=(m_0 l_1+m_1 b_1)\cos\theta_1/w$$
$$C_2=\{(m_0+m_1)l_2+m_2 b_2)\}\cos\theta_2/w$$
$$\theta_i=\sum_{j=0}^{i}\phi_i(i=0,1,2)$$

いま，ロボットの姿勢変化に対し，$I_s^{-1} I_m^T$の変化が比較的緩やかで一定と仮定できるとし，$I_s^{-1} I_m^T=[I_{sm1}, I_{sm2}]$とおくと，一般化ヤコビ行列 $J^*$は

$$J^*=J_m-J_s I_s^{-1} I_m^T$$

$$=\begin{bmatrix}\alpha_1\sin\theta_0+\alpha_2\sin\theta_1+\alpha_3\sin\theta_2, & \alpha_4\sin\theta_0+\alpha_5\sin\theta_1+\alpha_6\sin\theta_2\\ \beta_1\cos\theta_0+\beta_2\cos\theta_1+\beta_3\cos\theta_2, & \beta_4\cos\theta_0+\beta_5\cos\theta_1+\beta_6\cos\theta_2\end{bmatrix} \quad (2)$$

と表現できる。ただし

$$\alpha_1=I_{sm1}m_0 b_0/w$$
$$\alpha_2=(I_{sm1}-1)(m_0 l_1+m_1 b_1)/w$$
$$\alpha_3=(I_{sm1}-1)\{(m_0+m_1)l_2+m_2 b_2\}/w$$
$$\alpha_4=I_{sm2}m_0 b_0/w$$
$$\alpha_5=I_{sm2}(m_0 l_1+m_1 b_1)/w$$
$$\alpha_6=(I_{sm2}-1)\{(m_0+m_1)l_2+m_2 b_2\}/w$$
$$\beta_i=-\alpha_i(i=1,2,\cdots,6)$$

である。式(2)はパラメータ $\alpha_i,\beta_i(i=1,2,\cdots,6)$の線形結合で表現できることを示しており，これにより適応制御の導入が容易となる。

## 3．ディジタル適応制御則[10]

図１の宇宙ロボットに対するディジタル適応制御則については既に報告している[10]が，ここではより詳細に制御則について述べる。

まず，式(1)を離散化すると次式が得られる。

$$\dot{P}(k)=J^*(k)\dot{\phi}_m(k) \quad (3)$$

ただし，$\dot{P}(k)$，$J^*(k)$，$\dot{\phi}_m(k)$はそれぞれ，$k$時点におけるマニピュレータの手先速度ベクトル，一般化ヤコビ行列，関節の角速度ベクトルである。また$J^*(k)$は次のようになる。

$$J^*(k)=\begin{bmatrix}\alpha_1 S_0(k)+\alpha_2 S_1(k)+\alpha_3 S_2(k), & \alpha_4 S_0(k)+\alpha_5 S_1(k)+\alpha_6 S_2(k)\\ \beta_1 C_0(k)+\beta_2 C_1(k)+\beta_3 C_2(k), & \beta_4 C_0(k)+\beta_5 C_1(k)+\beta_6 C_2(k)\end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\theta_0(k)=\phi_0(k),\ \theta_1(k)=\phi_0(k)+\phi_1(k)$$
$$\theta_2(k)=\phi_0(k)+\phi_1(k)+\phi_2(k)$$
$$S_i(k)=\sin\theta_i(k),\ C_i(k)=\cos\theta_i(k)\ (i=0,1,2)$$

ここで，演算による遅れを１サンプル時間とすると，式(3)は

$$\dot{P}(k)=J^*(k)\dot{\phi}_m(k-1) \quad (5)$$

となり，さらに式(5)を

$$\dot{P}(k)=P(k+1)-P(k)$$
$$\dot{\phi}(k)=\dot{\phi}(k+1)-\phi(k)$$

として差分近似すると次式を得る。

$$P(k+1)-P(k)=J^*(k)\Delta\dot{\phi}_m(k) \quad (6)$$
$$\Delta\phi_m(k)=\phi_m(k)-\phi_m(k-1)$$

次に，ＦＦＲの手先位置制御法として，分解速度制御を拡張した次式を用いる。

$$\Delta\phi_m(k)[\hat{J}^*(k,k)]^{-1}\{P_d(k+1)-P_d(k)-\Lambda e(k)\} \quad (7)$$

ただし，$P_d(k)$は$k$時点における目標手先位置ベクトル，$e(k)$は手先位置誤差ベクトルで，

$$e(k)=P_d(k)-P(k) \quad (8)$$

である。また，$\Lambda$は手先位置誤差を補償するためのフィードバックゲイン行列である。さらに，$\hat{J}^*(k,k)$は，式(4)のパラメータ $\alpha_i,\beta_i(i=1,2,\cdots,6)$を可調整パラメータ $\hat{\alpha}_i(k),\hat{\beta}_i(k)(i=1,2,\cdots,6)$で置き換えたもので

$$\hat{J}^*(k,k)=\begin{bmatrix}\hat{\alpha}_1(k)S_0(k)+\hat{\alpha}_2(k)S_1(k)+\hat{\alpha}_3(k)S_2(k) & ,\hat{\alpha}_4(k)S_0(k)+\hat{\alpha}_5(k)S_1(k)+\hat{\alpha}_6(k)S_2(k)\\ \hat{\beta}_1(k)S_0(k)+\hat{\beta}_2(k)S_1(k)+\hat{\beta}_3(k)S_2(k) & ,\hat{\beta}_4(k)S_0(k)+\hat{\beta}_5(k)S_1(k)+\hat{\beta}_6(k)S_2(k)\end{bmatrix} \quad (9)$$

である。

さて，式(6)の同定モデルとして次式を考える。

$$\hat{P}(k+1)=P(k)+\hat{J}^*(k,k+1)\Delta\dot{\phi}_m(k) \quad (10)$$

この時，同定誤差 $\varepsilon(k)$は，式(6)，(10)より

$$\varepsilon(k)=\hat{P}(k)-P(k)$$
$$=P(k-1)+\hat{J}^*(k-1,k)\Delta\phi_m(k-1)-\{P(k)+J^*(k-1)\} \quad (11)$$
$$=\{\hat{J}^*(k-1,k)-J^*(k-1)\}\Delta\phi_m(k-1)$$

となる。式(11)に簡単化した一般化ヤコビ行列の推定値を代入すると

$$\varepsilon(k)=\begin{bmatrix}\varepsilon_1(k)\\ \varepsilon_2(k)\end{bmatrix}$$

$$=\Bigg\{\begin{bmatrix}\hat{\alpha}_1(k)S_0(k-1)+\hat{\alpha}_2(k)S_1(k-1)+\hat{\alpha}_3(k)S_2(k-1), & \hat{\alpha}_4(k)S_0(k-1)+\hat{\alpha}_5(k)S_1(k-1)+\hat{\alpha}_6(k)S_2(k-1)\\ \hat{\beta}_1(k)C_0(k-1)+\hat{\beta}_2(k)C_1(k-1)+\hat{\beta}_3(k)C_2(k-1), & \hat{\beta}_4(k)C_0(k-1)+\hat{\beta}_5(k)C_1(k-1)+\hat{\beta}_6(k)C_2(k-1)\end{bmatrix}$$

$$-\left[\begin{matrix}\alpha_1 S_0(k-1)+\alpha_2 S_1(k-1)+\alpha_3 S_2(k-1), \\ \beta_1 C_0(k-1)+\beta_2 C_1(k-1)+\beta_3 C_2(k-1),\end{matrix}\right.$$

$$\left.\begin{matrix}\hat{\alpha}_4 S_0(k-1)+\hat{\alpha}_5 S_1(k-1)+\hat{\alpha}_6 S_2(k-1) \\ \hat{\beta}_4 C_0(k-1)+\hat{\beta}_5 C_1(k-1)+\hat{\beta}_6 C_2(k-1)\end{matrix}\right]\Bigg\}\begin{bmatrix}\Delta\phi_1(k-1) \\ \Delta\phi_2(k-1)\end{bmatrix} \quad (12)$$

となり，さらに式(12)を要素に分解すると次式となる。

$$\varepsilon_1(k)=\{\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathrm{T}}(k)-\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\}\ \xi_1(k) \quad (13)$$

$$\varepsilon_2(k)=\{\hat{\boldsymbol{\beta}}^{\mathrm{T}}(k)-\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\}\ \xi_2(k) \quad (14)$$

ただし

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\mathrm{T}}(k)=[\hat{\alpha}_1(k),\hat{\alpha}_2(k),\hat{\alpha}_3(k),\hat{\alpha}_4(k),\hat{\alpha}_5(k),\hat{\alpha}_6(k)]$$

$$\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}=[\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4,\alpha_5,\alpha_6]$$

$$\boldsymbol{\xi}_1^{\mathrm{T}}(k)=[\Delta\phi_1(k-1)S_0(k-1),\Delta\phi_1(k-1)S_1(k-1),\Delta\phi_1(k-1)S_2(k-1)$$
$$\Delta\phi_2(k-1)C_0(k-1),\Delta\phi_2(k-1)C_1(k-1),\Delta\phi_2(k-1)C_2(k-1)]$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^{\mathrm{T}}(k)=[\hat{\beta}_1(k),\hat{\beta}_2(k),\hat{\beta}_3(k),\hat{\beta}_4(k),\hat{\beta}_5(k),\hat{\beta}_6(k)]$$

$$\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}=[\beta_1,\beta_2,\beta_3,\beta_4,\beta_5,\beta_6]$$

$$\boldsymbol{\xi}_2^{\mathrm{T}}(k)=[\Delta\phi_1(k-1)C_0(k-1),\Delta\phi_1(k-1)C_1(k-1),\Delta\phi_1(k-1)C_2(k-1)$$
$$\Delta\phi_2(k-1)C_0(k-1),\Delta\phi_2(k-1)C_1(k-1),\Delta\phi_2(k-1)C_2(k-1)]$$

である。ここで適応アルゴリズム[12]を適用することにより，$k\to\infty$で

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k)\to\boldsymbol{0},\ \hat{\boldsymbol{\alpha}}(k),\ \hat{\boldsymbol{\beta}}(k)\to const.$$

が得られ，

$$\hat{\boldsymbol{J}}^*(k,k+1)-\hat{\boldsymbol{J}}^*(k,k)\to\boldsymbol{0}$$

が達成できる。

また，式(7)を$\boldsymbol{P}_d(k)$について解くと次式となる。

$$(z-1)\boldsymbol{P}_d(k)=\hat{\boldsymbol{J}}^*(k,k)\boldsymbol{\Delta\phi}(k)+\boldsymbol{\Lambda\varepsilon}(k) \quad (15)$$

ただし，$z$はシフトオペレータを表わし，$z\boldsymbol{P}_d(k)=\boldsymbol{P}_d(k+1)$である。式(7)と式(15)より追従誤差は

$$\begin{aligned}(z-1)\boldsymbol{e}(k)&=(z-1)\{\boldsymbol{P}_d(k)-\boldsymbol{P}(k)\}\\ &=\{\boldsymbol{J}^*(k,k)-\boldsymbol{J}^*(k)\}\boldsymbol{\Delta\phi}(k)+\boldsymbol{\Lambda e}(k) \quad (16)\\ &=\boldsymbol{\varepsilon}(k+1)+\boldsymbol{\Lambda e}(k)\end{aligned}$$

となる。適応アルゴリズムにより$\varepsilon(k)\to 0$が達成されると式(16)は

$$(z-1)\boldsymbol{e}(k)=\boldsymbol{\Lambda e}(k) \quad (17)$$

となり，これより

$$\boldsymbol{e}(k+1)=(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Lambda})\boldsymbol{e}(k) \quad (18)$$

となる。いま，

$$\boldsymbol{\Lambda}=\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0\\ 0 & \lambda_2\end{bmatrix}$$

とすると，式(18)は

$$\boldsymbol{e}(k+1)=\begin{bmatrix}1+\lambda_1 & 0\\ 0 & 1+\lambda_2\end{bmatrix}\ \boldsymbol{e}(k) \quad (19)$$

となるので，$|1+\lambda_i|<1(i=1,2)$を満たすように$\lambda_1,\lambda_2$を選ぶと$\boldsymbol{e}(k)\to\boldsymbol{0}(k\to 0)$が達成できる。

## 4．テストベッドSMART-II

### 4.1　システム構成

開発したテストベッドSMART-IIのシステム構成、機器構成、そのブロック線図、およびFFRの外観を、それぞれ図2～5に示す。このシステム構成はSMART-Iのそれと基本的に同じである。今回改良した点は次の2点である。

(1)各関節を駆動するモータをハーモニックドライブギヤ付DCサーボモータ(定格出力20W,減速比1：100)に変更した。このモータにはインクリメント型エンコーダ(分解能：1000P/R)およびタコジェネレータも配備されている。なお、モータドライバは速度入力型である。

(2)計算能力を向上させるため、計算機をパーソナルコンピュータ (NEC PC-9821Xv13)に変更した。

なお、FFRに圧縮空気を供給するためのエアチューブを撤去するため、エアータンクを搭載したが、この

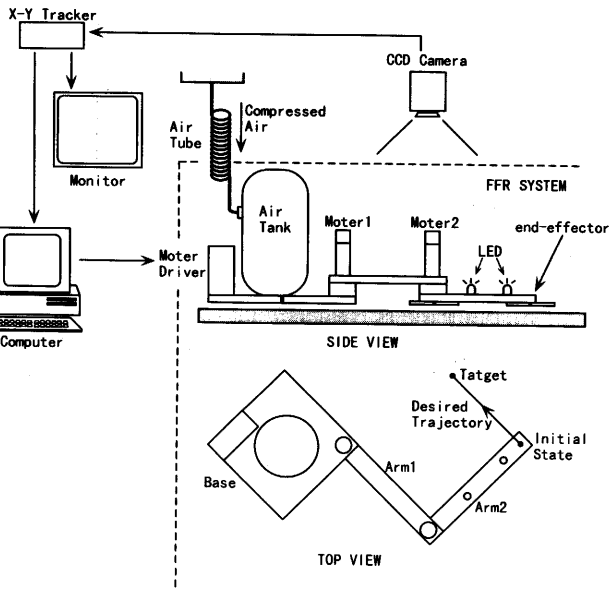


図2　SMART-IIのシステム構成

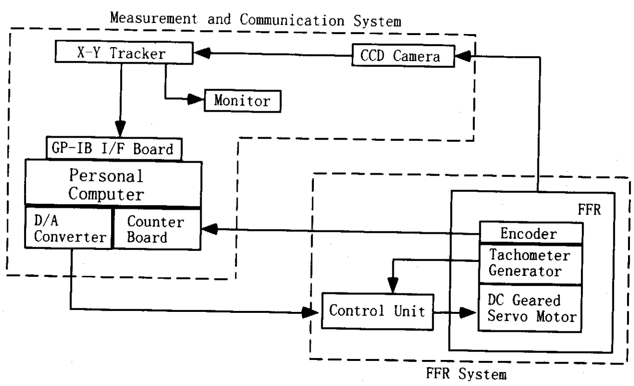


図3　機器構成

変更による効果については未解析であるので、これについての報告は次の機会に譲りたい。

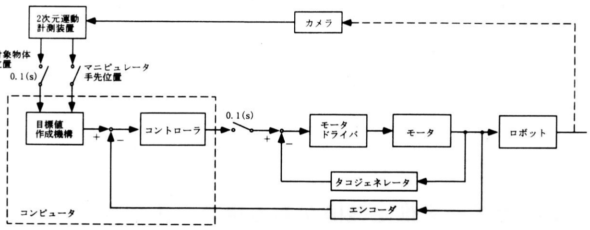


図４　制御系のブロック線図

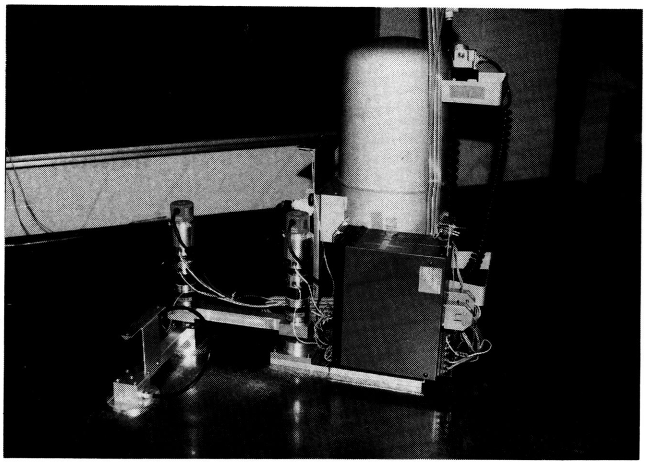

図５　システム外観

### 4.2　ＦＦＲモデルの諸元

試作したテストベッドＳＭＡＲＴ-IIの諸元を表１に示す。

表１　ＦＦＲの物理パラメータ

| | Size [cm×cm] | Center of Mass $a_i$ [cm] | Mass [Kg] | Moment of Inertia [Kg·cm²] |
|---|---|---|---|---|
| Body | 20.0 | 12.4 | 12.8 | 0.080 |
| Link1 | 20.0 | 10.0 | 2.06 | 0.020 |
| Link2 | 20.0 | 12.0 | 0.76 | 0.0054 |

### 4.3　サーボ特性

テストベッドに使用したハーモニックドライブギヤ付きＤＣサーボモータの，一定入力電圧に対するリンク２の時間履歴を図６に示す。また，目標位置を正弦波状に変化させた場合の関節角度の応答を図７に示す。なお，関節角の計測はエンコーダと２次元運動計測装置で得られる情報から求めた。これらの図より，次のことが明らかである。

(1)入力電圧に比例した関節角速度が得られており，良好な速度サーボ系が構成できている。

(2)関節部のバックラッシュはほとんど認められず，変動する目標値に対して良好な応答を示している。

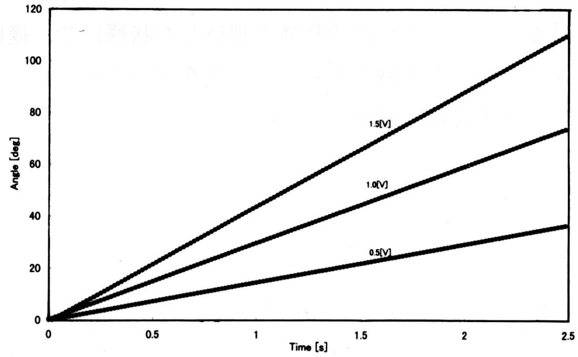


図６　一定入力電圧に対する時間履歴（リンク２）

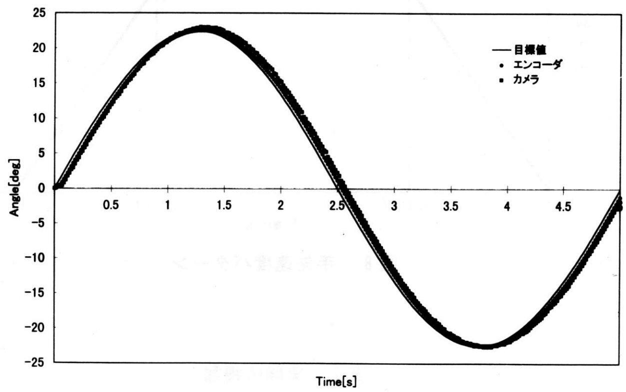


図７　関節角度応答（リンク２）

## 5　軌道制御実験

### 5.1　実験条件

実験は次の条件で行った。

(1)エンドエフェクタの目標軌道は，初期位置とターゲット位置を結ぶ直線軌道とした。

(2)移動距離を0.07mとし，運動計画時間を3.1sとした。

(3)最大手先速度を0.03m/sとし，図８に示したような直線軌道に沿った手先速度パターンを台形速度パタ

ーンとした。

(4)ＦＦＲの初期姿勢は次のように設定した。

$\phi_0=0.0\mathrm{deg}, \phi_1=-45\mathrm{deg}, \phi_2=90\mathrm{deg}$

(5)サンプリング周期は0.1秒とした。

(6)負荷は0.8Kg のおもりを用いた。

(7)手先位置誤差補償のためのフィードバックゲイン行列は

$$\Lambda=\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0\\ 0 & \lambda_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.3 & 0\\ 0 & -0.3\end{bmatrix}$$

とした。

(8)パラメータ調整則のゲイン(12)の初期値は10000に設定した。

実験は，表２に示すように負荷の有無と，ディジタル適応制御機構の有無に関連して４種類の実験を行った。たとえば，実験Ⅳは，マニピュレータに負荷を載せた状態（つまり未知浮遊物体を把持した状態）で，適応制御を行った実験である。なお負荷はマニピュレータの手先先端部に載せた。

## 5.2　実験結果

図９～図12はそれぞれ，表２の実験Ⅰ～Ⅳを行った場合の，ＦＦＲの運動の様子を表している。また，各図の右端には，手先の運動の様子を拡大して表示してある。いずれの図も0.5秒ごとの状態を表示している。初期手先位置と目標位置を結んだ直線が目標軌道で，この直線と短い線分が交わる交点が各サンプル時間での目標位置，○印が実際の手先位置である。これらの図より次のことが明らかである。

(1)図９と図11を比較すると，パラメータ推定機構がない場合，未知負荷があると，手先軌道は目標軌道より大きくずれる。

(2)パラメータ推定機構がある場合，未知負荷の有無にかかわらず追従誤差は小さい。特に，望ましい軌道からのズレがは小さい。

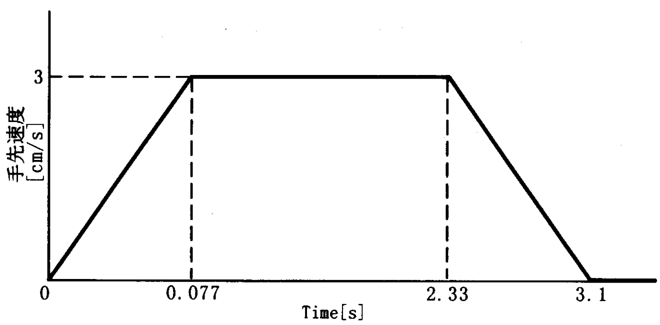


図８　手先速度パターン

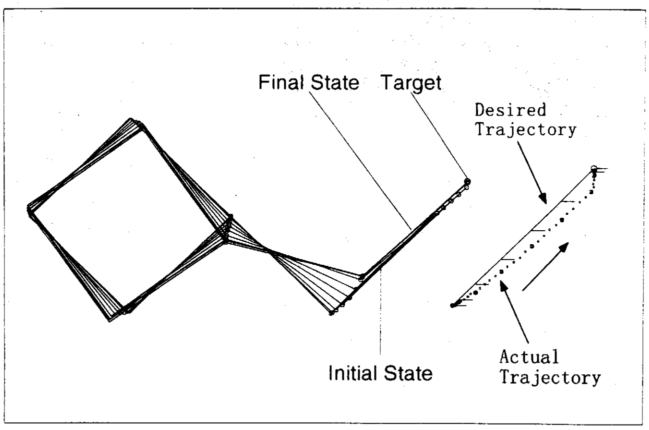


図９　実験結果（推定無し、負荷無し）

表２　実験の種類

| | | 負荷 | |
|---|---|---|---|
| | | 無 | 有 |
| 制御方法 | 分解速度制御 | 実験Ⅰ(図９) | 実験Ⅱ(図10) |
| | 適応制御 | 実験Ⅲ(図11) | 実験Ⅳ(図12) |

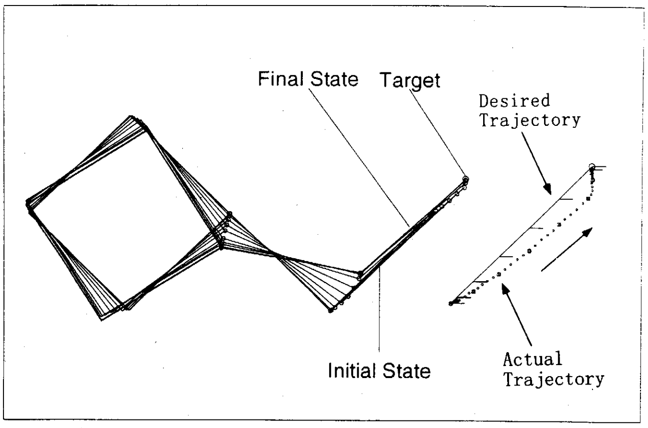


図10　実験結果（推定無し、負荷有り）

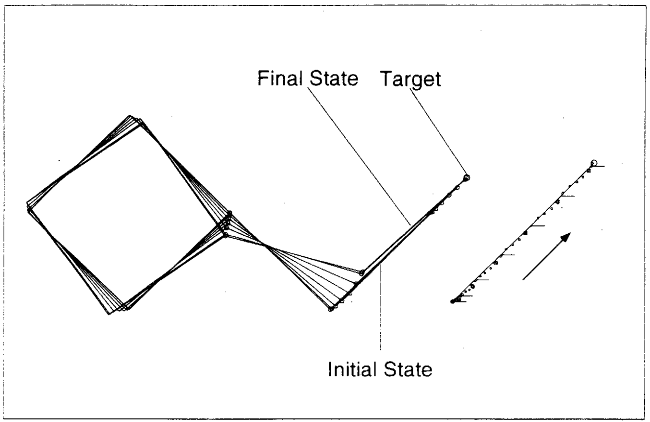


図11　実験結果（推定有り、負荷無し）

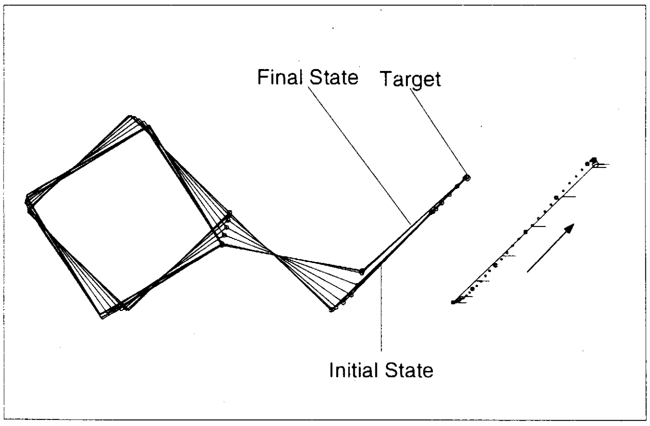


図12　実験結果（推定有り、負荷あり）

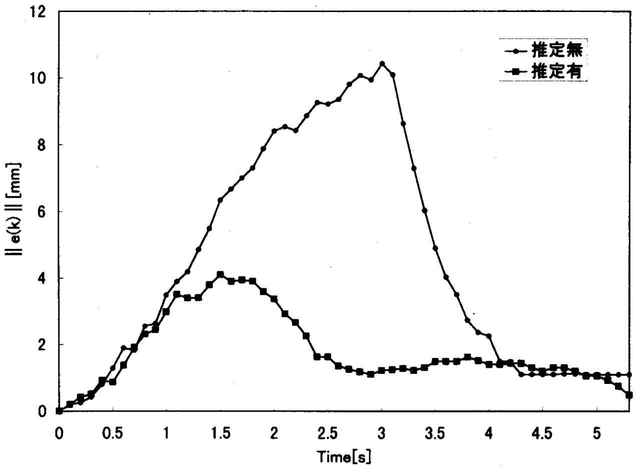


図13　手先位置偏差

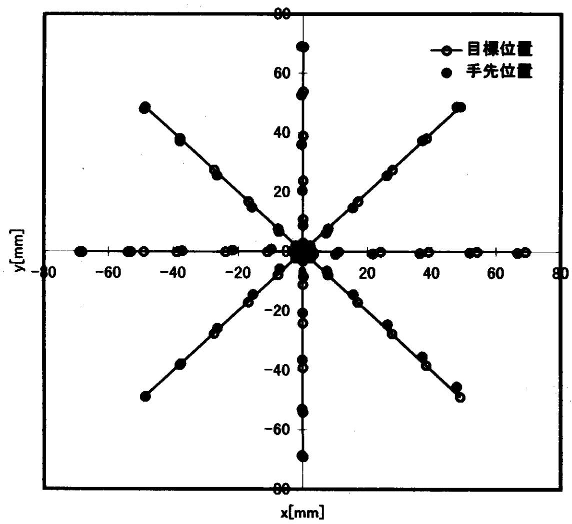


図14　実験結果（推定有り、負荷無し）

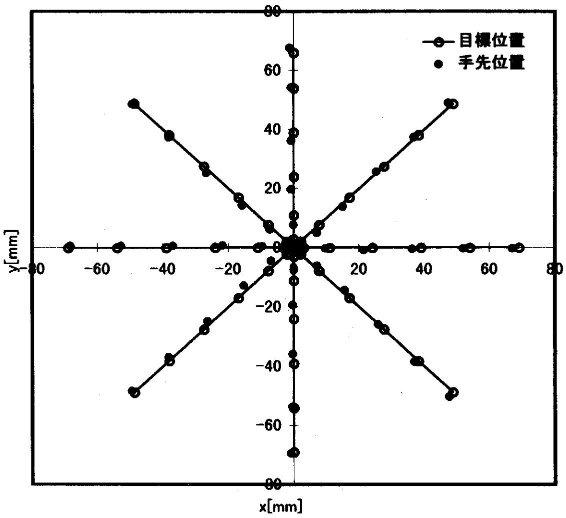


図15　実験結果（推定有り、負荷有り）

図13は，図11およびに図12における手先位置偏差のノルムの時間履歴を示したものである。この図より適応制御の有効性が明らかである。なお，実験開始後3.1秒以降は目標手先速度は０であるが，ロボットは微細な制御を行っているので，偏差のノルムは０となっていない。これはエアチューブ，ケーブルの影響によるものと考えられる。

図14，15は同じ初期状態から，実験III，IVの条件で，手先を８方向に動作させた場合の実験結果である。○が各サンプル時間での目標位置，●が実際の手先位置で，0.5秒ごとにそれらの位置を表示してある。図14，15より，手先の運動の方向および負荷の有無にかかわらず，ロボットの手先は目標軌道どおりに運動していることがわかる。

## 6. おわりに

本報告では、SMART-Iを改良したSMART-IIを用い、未知浮遊物体捕捉後のFFRの手先軌道制御の実験を、提案している適応制御則を適用して行い、テストベッドSMART-IIが有用であること、ならびに提案している適応制御法が有効であることを実験的に示した。

最後に、テストベッド製作にあたり協力をいただいた赤島俊二技官に感謝の意を表します。

## 参考文献

(1)宇宙環境利用推進センター，宇宙におけるロボティクスおよびオートメション研究フォーラム－成果報告書－(抜擢版)，1990.

(2) Z. Vafa and S. Dubowsky, On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulators Approach, Proc.of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 579-585, 1987.

(3)梅谷陽二，吉田和哉，一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用マニピュレータの分解速度制御，日本ロボット学会誌，第7巻4号,pp.327-337, 1989.

(4)加藤了三，宮崎保幸，山本俊彦，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，日本機械学会論文集C編，第59巻，第565号，pp.2758-2764，1993.

(5) R. Katoh, H.Sakon and T. Yamamoto, A Control Method of Space Manipulator Mounted on Free-Flying Robot by Using Parameter Identification, Proc. of AVIC'93, pp. 1178-1183, 1993.

(6)稲田智久，葉山鉄夫，加藤了三，山本俊彦，大川不二夫，宇宙マニピュレータSMART-I：システム構成と性能評価，九州工業大学研究報告書，第66号，pp.59-65, 1994.

(7) Y. Murotsu, S. Tsujio, K. Senda and M. Ozaki, Parameter Identification of Unknown Object Handled by Free-Flying Space Robot, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference AIAA 92-4307, 1992.

(8)吉田和哉，湯口康弘，梅谷陽二，宇宙ロボットの慣性パラメータ同定実験，第2回ロボットシンポジウム予稿集，pp.55-60，1992.

(9)岩田敏彰，戸田義継，町田和雄，自由飛行型宇宙ロボットの適応制御，第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.111-114，1991

(10)山本俊彦，小林順，大川不二夫，加藤了三，宇宙用マニピュレータのディジタル適応制御，日本機械学会論文集C編，第62巻，第593号，pp.168-174，1996.

(11)中塚敬一，スペースマニピュレータのディジタル適応制御，九州工業大学工学部卒業論文，1995.

(12)寺尾満，金井喜美雄，ロバスト適応制御入門，オーム社，1989.