宇宙用マニピュレータのデジタル適応制御* (第2報, 一般化ヤコビ行列の簡単化の妥当性)

小林 順^{*1}, 山本 俊彦^{*2}, 加藤 了三^{*3}
大川 不二夫^{*4}, 日野 英一^{*1}

Digital Adaptive Control of Space Manipulator (2nd Report, Validity of Simplifying a Generalized Jacobian Matrix)

Jun KOBAYASHI, Toshihiko YAMAMOTO, Ryo-ozo KATOH,
Fujio OHKAWA and Eiichi HINO

This paper deals with a digital adaptive control method for a manipulator mounted on a space robot after it captures an unknown object. Most of the previous control methods are based on the supposition that all physical parameters of the space robot system are known. However, if the end-effector catches an unknown object, the physical parameters of the robot are changed, and the control performance deteriorates. In this work, we propose two types of digital adaptive control algorithm in which a discretized kinematic equation is used. One is for discrete time Resolved Motion Rate Control (RMRC) with adaptive control and state feedback, and the other is for discrete time RMRC using a simplified Generalized Jacobian Matrix (GJM) with adaptive control and state feedback. Experimental results show that the control performance can be enhanced by use of the two proposed methods, and we conclude that simplifying a GJM is valid for the adaptive control system proposed in this paper.

Key Words: Space Robot, Adaptive Control, Digital Control, Simplified Generalized Jacobian Matrix, Resolved Motion Rate Control

1. はじめに

宇宙ステーションの建造をはじめとして, さまざまな宇宙開発が計画されている。これらの計画において, 宇宙ロボット技術は, 最大のキーテクノロジーであると考えられている⁽¹⁾。

宇宙ロボットのマニピュレータ制御法に関して, 多くの方法が提案されている^{(2)~(6)}。しかし, これらの制御法は宇宙ロボットの物理パラメータがすべて既知であることを前提としている。したがって, 例えば, 質量などの物理パラメータが未知である物体を捕捉する場合には, 宇宙ロボットの物理パラメータが変化するため, 期待した制御性能が得られない。

このような問題に対していくつかの方法が提案されている。例えば, 荒井ら⁽⁷⁾は地上用マニピュレータにおいて開発されている, 加速度情報と入力トルク情報をもとにして公称モデルに加わる外乱を推定し, それ

を補償する方法を宇宙用マニピュレータに適用した。吉田ら⁽⁸⁾や, Murotsu ら⁽⁹⁾は, 未知物体を把持した場合のロボットのパラメータ推定問題を検討しており, Katoh ら⁽¹⁰⁾は2種類のパラメータ推定法と分解速度制御法を併用する方法を提案した。また, 岩田らは⁽¹¹⁾モデル規範形適応制御法を用い, 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論議に終始し, 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。

文献(12)において, 著者らは宇宙ロボットに対して, 演算時間遅れを考慮した離散時間形適応制御系の設計を行い, 制御性能の改善, 安定性および追従誤差の収束性の証明を行った。そこでは, 制御系設計の簡潔化のために, 一般化ヤコビ行列の近似を行った。

本論文では, 一般化ヤコビ行列の近似を行わずに, 厳密な離散時間形適応制御系を設計する。また, ニリンクマニピュレータのシミュレータにより, 近似を用いた場合と用いない場合の離散時間形適応制御系の有効性を実験的に比較し, 一般化ヤコビ行列の簡単化について検証する。

* 原稿受付 1997年2月18日。

^{*1} 九州工業大学大学院 (〒820 飯塚市大字川津 680-4)。

^{*2} 正員, 久留米工業大学工学部 (〒830 久留米市上津町 2228)。

^{*3} 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)。

^{*4} 正員, 九州工業大学情報工学部 (〒820 飯塚市大字川津 680-4)。

2. 宇宙ロボットのモデル

本論文で対象とした宇宙ロボットの二次元モデルを図1に示す。ロボットは本体と2本のリンクからなるマニピュレータで構成され、各関節は回転関節で、アクチュエータを備えている。

また、設定した仮定および変数の定義を以下に示す。
[仮定]

1. 宇宙ロボットを構成するリンクなどの要素はすべて剛体とする。
2. 宇宙ロボットに外力は作用しない。すなわち、運動量保存則が成り立つ。
3. 宇宙ロボットの初期運動量は零である。
4. ベースの姿勢角、マニピュレータの各関節角、関節角速度およびエンドエフェクタの位置は、計測可能である。
5. 関節角速度サーボ系は、関節角速度指令値に対し瞬時に追従する。

[変数]

m_i : リンク i の質量 (ベースはリンク零とみなす)

w : 宇宙ロボット全体の質量

I_i : リンク i の質量中心まわりの慣性モーメント

a_i : 関節 i からリンク i の質量中心までの長さ

b_i : リンク i の質量中心から関節 $i+1$ もしくはエンドエフェクタまでの長さ

l_i : リンク i の長さ ($l_i = a_i + b_i$)

P : エンドエフェクタの位置ベクトル ($P = [x, y]^T$)

ϕ_0 : ベースの姿勢角

ϕ_{mi} : 関節 i の相対関節角 ($\phi_m = [\phi_{m1}, \phi_{m2}]^T$)

θ_i : 関節 i の絶対角

$\dot{\phi}_{mc}$: 関節角速度指令値

3. 運動学関係式の離散化

宇宙ロボットの運動学関係式は、次式で与えられる⁽³⁾。

Fig. 1 2D model of space robot

$$\dot{P}(t) = J^*(\phi_0(t), \phi_m(t)) \dot{\phi}_m(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $J^*(t) \in R^{2 \times 2}$ は一般化ヤコビ行列である。

$\dot{P}(t)$ にオイラーの前進差分近似を用い、式(1)を離散化すると、次式となる。

$$P(k+1) = P(k) + TJ^*(k) \dot{\phi}_m(k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 T はサンプリング周期である。

さらに、演算時間として1サンプリング周期のむだ時間を考慮し、仮定5を用いると、式(2)は次式のようになる。

$$P(k+1) = P(k) + TJ^*(k) \dot{\phi}_{mc}(k-1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{\phi}_m(k) = \dot{\phi}_{mc}(k-1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究では、式(3)を対象とするロボットの数式モデルとし、制御系の設計を行う。

4. 適応制御系の設計 I

宇宙ロボットの分解速度制御では、前述のように一般化ヤコビ行列 J^* が提案されている⁽³⁾。しかし、 J^* の正確な同定、とりわけ未知浮遊物体を捕捉した場合の同定は、質量や慣性モーメントの変化により困難であり、その結果、満足いく制御性能が期待できない。

動特性が未知、あるいは変動する制御対象に対して、適応制御が有効であることが知られている。そこで、 J^* が未知の場合の離散時間形適応制御系を設計する。

4.1 パラメータ同定 はじめに、式(3)を関節角速度指令値 $\dot{\phi}_{mc}(k)$ について解くと次式となる。

$$\dot{\phi}_{mc}(k) = \frac{1}{T} [J^*(k+1)]^{-1} \{P(k+2) - P(k+1)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、一般化ヤコビ行列の逆行列は次式で表すことができる。

$$[J^*(k)]^{-1} = \frac{1}{|J_d(k)|} J_n(k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$|J_d(k)| = \sum_{i=1}^9 \kappa_i f_{\kappa i}(k)$$

$$J_n(k) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{10} \sigma_i f_{\sigma 1 i}(k), & \sum_{i=1}^{10} \sigma_i f_{\sigma 2 i}(k) \\ \sum_{i=1}^{10} \gamma_i f_{\gamma 1 i}(k), & \sum_{i=1}^{10} \gamma_i f_{\gamma 2 i}(k) \end{bmatrix}$$

ここで、 κ_i , σ_i と γ_i は宇宙ロボットの物理パラメータ (例えば、リンクの質量や長さ) から構成されるパラメータである。具体的には、例えば、パラメータ κ_i は、

$$\kappa_i = -\frac{m_0 b_0 (m_0 l_1 + m_1 b_1) \{ (m_0 + m_1) m_2 a_2^2 + w l_2 \}}{w^3}$$

である。また、 $f_{\kappa i}(k)$, $f_{\sigma 1 i}(k)$, $f_{\sigma 2 i}(k)$, $f_{\gamma 1 i}(k)$ と $f_{\gamma 2 i}(k)$ は既知関数である。

式(4)、(5)と(6)から次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_{mc}(k) = & A(k+1) \dot{\phi}_m(k+1) \\ & + B(k+1) \Delta P(k+2) \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(k) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^9 \alpha_i f'_{\kappa i}(k), & 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^9 \beta_i f'_{\kappa i}(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}(k) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=10}^{19} \alpha_i f'_{\sigma 1i}(k), & \sum_{i=10}^{19} \alpha_i f'_{\sigma 2i}(k) \\ \sum_{i=10}^{19} \beta_i f'_{\tau 1i}(k), & \sum_{i=10}^{19} \beta_i f'_{\tau 2i}(k) \end{bmatrix} \\ \alpha_i &= \begin{cases} -\frac{\kappa_i}{\kappa_1} & (i=1, \dots, 9) \\ \frac{\sigma_{i-9}}{\kappa_1} & (i=10, \dots, 19) \end{cases}, \\ \beta_i &= \begin{cases} -\frac{\kappa_i}{\kappa_1} & (i=1, \dots, 9) \\ \frac{\gamma_{i-9}}{\kappa_1} & (i=10, \dots, 19) \end{cases}, \\ f'_{\kappa i}(k) &= \begin{cases} C_{01}(k) & (i=1) \\ S_{01}(k) f_{\kappa i}(k) & (i=2, \dots, 9) \end{cases} \\ f'_{\sigma 1i}(k) &= \frac{1}{T} S_{01}(k) f_{\sigma 1(i-9)}(k), \\ f'_{\sigma 2i}(k) &= \frac{1}{T} S_{01}(k) f_{\sigma 2(i-9)}(k) \\ f'_{\tau 1i}(k) &= \frac{1}{T} S_{01}(k) f_{\tau 1(i-9)}(k), \\ f'_{\tau 2i}(k) &= \frac{1}{T} S_{01}(k) f_{\tau 2(i-9)}(k) \quad (i=10, \dots, 19) \\ S_{01}(k) &= \sin\{\theta_0(k) - \theta_1(k)\}, \\ C_{01}(k) &= \cos\{\theta_0(k) - \theta_1(k)\} \\ \Delta \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}(k) - \mathbf{P}(k-1) \end{aligned}$$

である.

次に, 関節角速度指令値 $\dot{\phi}_{mc}(k)$ の推定モデル $\hat{\phi}_{mc}(k)$ を次式で構成する.

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{mc}(k-2) &= \hat{\mathbf{A}}(k-1, k) \dot{\phi}_m(k-1) \\ &+ \hat{\mathbf{B}}(k-1, k) \Delta \mathbf{P}(k) \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}(m, n) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^9 \hat{\alpha}_i(n) f'_{\kappa i}(m), & 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^9 \hat{\beta}_i(n) f'_{\kappa i}(m) \end{bmatrix} \\ \hat{\mathbf{B}}(m, n) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=10}^{19} \hat{\alpha}_i(n) f'_{\sigma 1i}(m), & \sum_{i=10}^{19} \hat{\alpha}_i(n) f'_{\sigma 2i}(m) \\ \sum_{i=10}^{19} \hat{\beta}_i(n) f'_{\tau 1i}(m), & \sum_{i=10}^{19} \hat{\beta}_i(n) f'_{\tau 2i}(m) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

であり, $\hat{\mathbf{A}}(m, n)$ と $\hat{\mathbf{B}}(m, n)$ は, 時刻 mT における関節角と, 時刻 nT における未知物理パラメータ α_i と β_i の推定値から構成される $\mathbf{A}(k)$ と $\mathbf{B}(k)$ の推定値である.

ここで, 推定誤差を,

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= [\varepsilon_1(k), \varepsilon_2(k)]^T = \hat{\phi}_{mc}(k-2) - \dot{\phi}_{mc}(k-2) \\ &\dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

と定義すると, 式(7)と(8)から $\varepsilon(k)$ は次式となる.

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= \{\hat{\mathbf{A}}(k-1, k) - \mathbf{A}(k-1)\} \dot{\phi}_m(k-1) \\ &+ \{\hat{\mathbf{B}}(k-1, k) - \mathbf{B}(k-1)\} \Delta \mathbf{P}(k) \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

式(10)を要素に分解すると次式となる.

$$\varepsilon_1(k) = \{\hat{\alpha}(k) - \alpha\}^T \xi_1(k) \dots \dots \dots (11 \cdot a)$$

$$\varepsilon_2(k) = \{\hat{\beta}(k) - \beta\}^T \xi_2(k) \dots \dots \dots (11 \cdot b)$$

ここで,

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{19}]^T, \beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{19}]^T$$

$$\xi_1(k) = [\xi_{11}, \xi_{12}, \dots, \xi_{19}]^T,$$

$$\xi_2(k) = [\xi_{21}, \xi_{22}, \dots, \xi_{219}]^T$$

$$\xi_{1i}(k) = \begin{cases} f'_{\kappa i}(k-1) \dot{\phi}_{m1}(k-1) & (i=1, \dots, 9) \\ f'_{\sigma 1i}(k-1) \Delta x(k) + f'_{\sigma 2i}(k-1) \Delta y(k) & (i=10, \dots, 19) \end{cases}$$

$$\xi_{2i}(k) = \begin{cases} f'_{\kappa i}(k-1) \dot{\phi}_{m2}(k-1) & (i=1, \dots, 9) \\ f'_{\tau 1i}(k-1) \Delta x(k) + f'_{\tau 2i}(k-1) \Delta y(k) & (i=10, \dots, 19) \end{cases}$$

である.

式(11)は誤差方程式の一般形であるので, 可調整パラメータ $\hat{\alpha}(k)$ と $\hat{\beta}(k)$ に対する適応アルゴリズムとして,

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{\alpha}(k-1) - \Gamma_1(k-1) \xi_1(k) \varepsilon_1(k) \dots (12 \cdot a)$$

$$\Gamma_1(k) = \Gamma_1(k-1) - \frac{\Gamma_1(k-1) \xi_1(k) \xi_1^T(k) \Gamma_1(k-1)}{1 + \xi_1^T(k) \Gamma_1(k-1) \xi_1(k)}$$

$$\hat{\beta}(k) = \hat{\beta}(k-1) - \Gamma_2(k-1) \xi_2(k) \varepsilon_2(k) \dots (12 \cdot b)$$

$$\Gamma_2(k) = \Gamma_2(k-1) - \frac{\Gamma_2(k-1) \xi_2(k) \xi_2^T(k) \Gamma_2(k-1)}{1 + \xi_2^T(k) \Gamma_2(k-1) \xi_2(k)}$$

を用いることにより, $k \rightarrow \infty$ で,

$$\varepsilon(k) \rightarrow \mathbf{0} \dots \dots \dots (12 \cdot b)$$

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(k+1) - \hat{\alpha}(k) &\rightarrow \mathbf{0}, \hat{\beta}(k+1) - \hat{\beta}(k) \rightarrow \mathbf{0} \\ &\dots \dots \dots (12 \cdot c) \end{aligned}$$

$$\hat{\mathbf{A}}(k, k+1) - \hat{\mathbf{A}}(k, k) \rightarrow \mathbf{0},$$

$$\hat{\mathbf{B}}(k, k+1) - \hat{\mathbf{B}}(k, k) \rightarrow \mathbf{0} \dots \dots \dots (12 \cdot d)$$

が保証される⁽¹³⁾.

4.2 制御則 まず, 宇宙用マニピュレータの手先位置制御手法として, 次式を提案する.

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_{mc}(k) &= [\mathbf{I} - \hat{\mathbf{A}}(k, k)]^{-1} \hat{\mathbf{B}}(k, k) \cdot \{\mathbf{P}_d(k+2) \\ &- \mathbf{P}_d(k+1) - \Delta \mathbf{e}(k)\} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここで,

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{P}_d(k) - \mathbf{P}(k): \text{追従誤差ベクトル}$$

$$\Delta = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2\}: \text{追従誤差ゲイン行列}$$

である.

式(4)を用いて, 式(13)は次のように変形できる.

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_{mc}(k) &= \hat{\mathbf{A}}(k, k) \dot{\phi}_m(k+1) + \hat{\mathbf{B}}(k, k) \{\mathbf{P}_d(k+2) \\ &- \mathbf{P}_d(k+1) - \Delta \mathbf{e}(k)\} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

式(8), (9), (12 \cdot d) と式(14)から, $k \rightarrow \infty$ で,

$$\varepsilon(k+2) = \{\hat{\mathbf{A}}(k+1, k+1) - \hat{\mathbf{A}}(k, k)\} \dot{\phi}_m(k+1)$$

$$\begin{aligned}
& + \hat{\mathbf{B}}(k+1, k+1) \{ \mathbf{P}(k+2) - \mathbf{P}(k+1) \} \\
& - \hat{\mathbf{B}}(k, k) \{ \mathbf{P}_d(k+2) - \mathbf{P}_d(k+1) - \mathbf{A}\mathbf{e}(k) \} \\
& \rightarrow 0 \dots\dots\dots (15)
\end{aligned}$$

が保証される。

次に,

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{A}}(k+1, k+1) & \cong \hat{\mathbf{A}}(k, k), \\
\hat{\mathbf{B}}(k+1, k+1) & \cong \hat{\mathbf{B}}(k, k)
\end{aligned}$$

を仮定し, さらに関節角速度 $\dot{\phi}_m(k)$ が有界ならば, 式(15)は次式となる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}(k+2) & = -\hat{\mathbf{B}}(k, k)(z^2\mathbf{I} - z\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{e}(k) \rightarrow 0 \\
& \dots\dots\dots (16)
\end{aligned}$$

ただし, z は1 サンプリング周期の進み演算子である。

したがって, 式(16)から, $|\hat{\mathbf{B}}(k, k)| \neq 0$ と $-1 < \lambda_i < 0$ が満足されるならば, $k \rightarrow \infty$ において,

$$\mathbf{e}(k) \rightarrow 0 \dots\dots\dots (17)$$

が保証される。

5. 適応制御系の設計II⁽¹²⁾

4章で述べた離散時間形適応制御系は, パラメータ数が多く複雑である。そこで本章では, 一般化ヤコビ行列の簡単化を行い, 制御系を簡潔化した場合を示す。

5.1 一般化ヤコビ行列の簡単化 一般化ヤコビ行列は次式に示すように, 四つの要素から成り立っている⁽³⁾。

$$\mathbf{J}^* = \mathbf{J}_m - \mathbf{J}_s \mathbf{I}_s^{-1} \mathbf{I}_m^T$$

ここで, $\mathbf{I}_s$ は衛星本体の慣性モーメント, $\mathbf{I}_m$ はマニピ

ュレータの慣性モーメントベクトル, $\mathbf{J}_s$ と $\mathbf{J}_m$ は各リンクの質量比を含んだ拡張ヤコビ行列である。

一般化ヤコビ行列を構成する要素 $\mathbf{I}_s$, $\mathbf{I}_m$, $\mathbf{J}_s$ と $\mathbf{J}_m$ は, 物理パラメータに関して線形表示可能であるが, 一般化ヤコビ行列自身は線形表示不可能である。

そこで, 以下のような仮定を設ける。

[仮定] $\mathbf{I}_s^{-1} \mathbf{I}_m^T$ は一定である。

この仮定により, 一般化ヤコビ行列は以下に示すように, 物理パラメータに関して線形表示できる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_s^* & = \begin{bmatrix} \alpha_1 S_0 + \alpha_2 S_1 + \alpha_3 S_2, & \alpha_4 S_0 + \alpha_5 S_1 + \alpha_6 S_2 \\ \beta_1 C_0 + \beta_2 C_1 + \beta_3 C_2, & \beta_4 C_0 + \beta_5 C_1 + \beta_6 C_2 \end{bmatrix} \\
& \dots\dots\dots (18)
\end{aligned}$$

ここで,

$$S_i = \sin \theta_i, C_i = \cos \theta_i, \theta_i = \sum_{j=0}^i \phi_j \quad (i=0, 1, 2)$$

$\alpha_j, \beta_j (j=1, \dots, 6)$: 宇宙ロボットの物理パラメータからなるパラメータ

である。また, 式(3)は,

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}(k+1) & = \mathbf{P}(k) + T \mathbf{J}_s^*(k) \dot{\phi}_m(k) \\
& = \mathbf{P}(k) + T \mathbf{J}_s^*(k) \dot{\phi}_{mc}(k-1) \dots\dots\dots (19)
\end{aligned}$$

となる。

5.2 パラメータ同定 エンドエフェクタの位置ベクトル $\mathbf{P}(k)$ の推定モデル $\hat{\mathbf{P}}(k)$ を次式で構成する。

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{P}}(k) & = \mathbf{P}(k-1) + T \hat{\mathbf{J}}_s^*(k-1, k) \dot{\phi}_m(k-1) \\
& \dots\dots\dots (20)
\end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{J}}_s^*(m, n) & = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_1(n) S_0(m) + \hat{\alpha}_2(n) S_1(m) + \hat{\alpha}_3(n) S_2(m), & \hat{\alpha}_4(n) S_0(m) + \hat{\alpha}_5(n) S_1(m) + \hat{\alpha}_6(n) S_2(m) \\ \hat{\beta}_1(n) C_0(m) + \hat{\beta}_2(n) C_1(m) + \hat{\beta}_3(n) C_2(m), & \hat{\beta}_4(n) C_0(m) + \hat{\beta}_5(n) C_1(m) + \hat{\beta}_6(n) C_2(m) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

であり, $\hat{\mathbf{J}}_s^*(m, n)$ は, 時刻 mT における関節角と, 時刻 nT における未知物理パラメータ α_i と β_i の推定値から構成される, $\mathbf{J}_s^*(k)$ の推定値である。

ここで, 推定誤差を,

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = [\varepsilon_1(k), \varepsilon_2(k)]^T = \hat{\mathbf{P}}(k) - \mathbf{P}(k) \dots\dots\dots (21)$$

とすると, 式(19)と(20)から,

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = T \{ \hat{\mathbf{J}}^*(k-1, k) - \mathbf{J}^*(k-1) \} \dot{\phi}_m(k-1) \dots\dots\dots (22)$$

となり, 要素に分解すると次式となる。

$$\varepsilon_1(k) = \{ \hat{\alpha}(k) - \alpha \}^T \xi_1(k-1) \dots\dots\dots (23 \cdot a)$$

$$\varepsilon_2(k) = \{ \hat{\beta}(k) - \beta \}^T \xi_2(k-1) \dots\dots\dots (23 \cdot b)$$

ここで,

$$\begin{aligned}
\alpha & = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6]^T, \beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_6]^T \\
\xi_1(k) & = T [\dot{\phi}_{m1}(k) S_0(k), \dot{\phi}_{m1}(k) S_1(k), \dot{\phi}_{m1}(k) S_2(k), \dot{\phi}_{m2}(k) S_0(k), \dot{\phi}_{m2}(k) S_1(k), \dot{\phi}_{m2}(k) S_2(k)] \\
\xi_2(k) & = T [\dot{\phi}_{m1}(k) C_0(k), \dot{\phi}_{m1}(k) C_1(k), \dot{\phi}_{m1}(k) C_2(k), \dot{\phi}_{m2}(k) C_0(k), \dot{\phi}_{m2}(k) C_1(k), \dot{\phi}_{m2}(k) C_2(k)]
\end{aligned}$$

である。

式(24)は誤差方程式の一般形であるので, 4.1節と同様に, 式(12)の適応アルゴリズムにより, $k \rightarrow \infty$ で, 次式が保証される⁽¹³⁾。

$$\varepsilon(k) \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (24 \cdot a)$$

$$\hat{\alpha}(k+1) - \hat{\alpha}(k) \rightarrow 0, \hat{\beta}(k+1) - \hat{\beta}(k) \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (24 \cdot b)$$

$$\hat{J}_s^*(k, k+1) - \hat{J}_s^*(k, k) \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (24 \cdot c)$$

5・3 制御則 まず, 手先位置制御手法を次式とする.

$$\dot{\phi}_{mc}(k) = \frac{1}{T} [\hat{J}_s^*(k, k)]^{-1} \{P_d(k+2) - P_d(k+1) - \Delta e(k)\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式(19)と(25)より, 追従誤差方程式は次式となる.

$$(z^2 I - zI - \Lambda)e(k) = T\{\hat{J}_s^*(k, k) - \hat{J}_s^*(k+1, k+1)\}\dot{\phi}_m(k+1) \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここで, 1 サンプル間での一般化ヤコビ行列 J_s^* の変化は比較的小さいと考え,

$$\hat{J}_s^*(k+1, k+2) \cong \hat{J}_s^*(k, k+1)$$

と近似すると, 式(26)は,

$$(z^2 I - zI - \Lambda)e(k) = T\{\hat{J}_s^*(k+1, k+2) - \hat{J}_s^*(k+1, k+1)\}\dot{\phi}_m(k+1) - T\{\hat{J}_s^*(k, k+1) - \hat{J}_s^*(k, k)\}\dot{\phi}_m(k+1) \quad \dots\dots\dots (27)$$

となる. さらに, 式(22)より, 次式となる.

$$(z^2 I - zI - \Lambda)e(k) = \varepsilon(k+2) - T\{\hat{J}_s^*(k, k+1) - \hat{J}_s^*(k, k)\}\dot{\phi}_m(k+1) \quad \dots\dots\dots (28)$$

式(24・a)と(24・c)から, 関節角速度 $\dot{\phi}_m(k)$ が有界なれば, $k \rightarrow \infty$ で,

$$(z^2 I - zI - \Lambda)e(k) \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

が保証される. ゆえに, フィードバックゲインを $-1 < \lambda_i < 0$ を満たすように選ぶと, 追従誤差の収束性

$$e(k) \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

が保証される.

6. 実 験

6・1 シミュレータ⁽¹⁴⁾ 微小重力環境を模擬した空気浮上式シミュレータにより実験を行った. 実験で使ったシミュレータの構成を図2に示す. また, 表1にシミュレータの物理パラメータ値を示す.

シミュレータは, 宇宙ロボットシステムと座標計測システムから構成されている. 宇宙ロボットシステムは, 本体部と1本の二リンク回転形マニピュレータで構成されている. また, 座標計測システムは, リンク2の先端および先端より100 mm離れた位置をCCDカメラでX-Yトラッカに取込み, コンピュータに転送し, 手先位置を求めている.

6・2 実験結果 6・1節で示したシミュレータを用いて, 適応制御系IおよびIIによる手先位置制御実験を行った. ここでは, 未知浮遊物体として0.8 kg

Table 1 Physical parameter values of simulator

	Base	Link1	Link2
Mass [kg]	13	2.0	0.8
Moment of Inertia [kgm ²]	0.18	0.020	0.0057
Link Length [m]	—	0.20	0.20
Frame Length [m]	0.30 × 0.30	—	—

Fig.2 Simulator

の重りをリンク2上の適当な位置に載せた. なお, サンプル周期 T およびフィードバックゲイン Λ は, それぞれ $T=0.1$, $\Lambda=\text{diag}\{-0.3, -0.3\}$ とした. 推定パラメータの初期値は, 宇宙ロボットのみの物理パラメータから構成した. 目標手先位置 $P_d(k)$ は, 初期状態における手先位置からターゲット位置までの直線上に, 0.005 m 間隔で設定した.

適応制御則I [式(13)]を用いた場合の実験結果を図3から5に示す. ロボットの姿勢は, 0.5 s 間隔で描いている. また, 適応制御則I [式(13)]と適応制御則II [式(25)]を用いたときの, 追従誤差を図6から8に示す. これらの実験結果から, 適応制御系Iと適応制御系IIには, 制御性能の差はほとんどないことがわかる. また, 目標手先位置 $P_d(k)$ を0.01 m 間隔で設定する場合も実験を行ったが, 同様の結果が得られた. これらの結果より, 実験における動作範囲においては, $I_s^{-1}I_m^T$ の変化は小さく, その変動も適応制御則でカバーされていることがわかる.

一方, 一般化ヤコビ行列の簡単化を行った適応制御系IIは, 適応制御系Iよりも明らかにシンプルである. 例えば, ここで対象とした二リンク平面マニピュレータでは, 適応制御系Iにおける推定パラメータの数が38であるのに対して, 適応制御系IIでは12である.

したがって, 提案した適応制御系の設計においては,

 Fig. 3 Experimental result; adaptive control I, target position $=(-0.1, 0.05)$

 Fig. 4 Experimental result; adaptive control I, target position $=(-0.1, 0.0)$

 Fig. 5 Experimental result; adaptive control I, Target position $=(-0.1, -0.05)$

$I_s^{-1}I_m^T$ は一定であると仮定し、一般化ヤコビ行列を簡単化することは有用であると言える。

7. 考察と結論

ここでは、まず、6章とは異なる条件下での、有効性について、シミュレーションにより考察する。さらに、最後に、結論を述べる。

7.1 考察 6章では、ベースとマニピュレータの質量比が大きい場合について検討した。本節では図9に示すような、物理パラメータが同じである三つのリンクからなるロボットを対象とし、そのロボットに対しても一般化ヤコビ行列の簡単化が有用であるかを、計算機シミュレーションにより考察する。ロボットの物理パラメータは、表2のように設定した。こ

 Fig. 6 Comparison of tracking error; target position $=(-0.1, 0.05)$

 Fig. 7 Comparison of tracking error; target position $=(-0.1, 0.0)$

 Fig. 8 Comparison of tracking error; target position $=(-0.1, -0.05)$

Fig. 9 2D model of snake-type space robot

Table 2 Physical parameter values of snake-type space robot

	Link0	Link1	Link2
Mass [kg]	5.0	5.0	5.0
Moment of Inertia [kgm ²]	0.050	0.050	0.050
Link Length [m]	0.20	0.20	0.20

Fig. 10 Simulation result; adaptive control II

Fig. 11 Comparison of tracking error; target position = $(-0.1, 0.05)$ Fig. 12 Comparison of tracking error; target position = $(-0.1, 0.0)$ Fig. 13 Comparison of tracking error; target position = $(-0.1, -0.05)$ Fig. 14 Comparison of tracking error; target position = $(-0.25, 0.15)$

性能はほとんど変わらないことが示され、本論文において提案した適応制御系の設計においては、 $I_s^{-1}I_m^T$ は一定であると仮定し、一般化ヤコビ行列を簡単化することが、妥当であることが明らかになった。

最後に、実験に協力いただいた九州工業大学大学院工学研究科中塚敬一君に深く感謝する。

文 献

- (1) 梅谷陽二, 日本ロボット学会誌, 7-1(1989), 72-77.
- (2) Vafa, Z., ほか1名, *Proc. of 7th World Congress of IFToMM*, (1987), 579-585.
- (3) 梅谷陽二・吉田和哉, 日本ロボット学会誌, 7-4(1989), 63-73.
- (4) 山田克彦・土屋和雄, 計測自動制御学会論文集, 26-7(1990), 765-772.
- (5) 升谷保博・宮崎文夫, 日本ロボット学会誌, 7-6(1989), 647-655.
- (6) 播磨浩一・ほか3名, 日本ロボット学会誌, 9-5(1991), 572-579.
- (7) 荒井裕彦・ほか2名, 日本ロボット学会誌, 10-4(1991), 481-489.
- (8) 吉田和哉・ほか2名, 第2回ロボットシンポジウム予稿集, (1992), 55-60.
- (9) Murotsu, Y., ほか3名, *AIAA Guidance, Navigation and Control Congerence*, (1991), 1899-1909.
- (10) Katoh, R., ほか2名, *Proc. Asia-Pacific Vib. Conf. '93*, Kitakyushu Japan, (1993), 1205-1209.
- (11) 岩田敏彰・ほか2名, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 111-114.
- (12) 山本俊彦・ほか3名, 機論, 62-593, C(1996), 168-174.
- (13) 計測自動制御学会編, 自動制御ハンドブック(基礎編), (1983), 719, オーム社.
- (14) 稲田智久・ほか4名, 九州工業大学研究報告(工学), 66(1994), 59-65.

では、このロボットをヘビ形ロボットと呼ぶ。

適応制御系 I および適応制御系 II による、ヘビ形ロボットの手先位置制御シミュレーションを行った。未知浮遊物体質量やサンプリング周期などの条件は、6章の実験と同じに設定した。

適応制御系 II を用いた場合の結果を図 10 に示す。また、適応制御系 I と適応制御系 II を用いたときの、追従誤差を図 11 から図 14 に示す。

これらの結果から、ヘビ形ロボットの場合でも、適応制御系 I と適応制御系 II には、制御性能の差はほとんどなく、一般化ヤコビ行列の簡単化が有用であることがわかる。

7・2 結論 本論文では、宇宙ロボットに対して、2種類の離散時間形適応制御系の設計を行った。一つは、厳密な一般化ヤコビ行列を用いた適応制御系である。もう一方は、制御系を簡潔にするために、一般化ヤコビ行列の簡単化を行った適応制御系である。この2種類の制御系の性能を比較するために、シミュレータによる実験を行った。その結果、2種類の制御系の