低減速関節を有するマニピュレータの適応制御*

末 広 利 範^{*1}, 大川 不二夫^{*2}, 黒 須 顕 二^{*2}

Adaptive Control of Manipulators with Low Reduction Joints

Toshinori SUEHIRO, Fujio OHKAWA and Kenji KUROSU

This paper presents an application of a discrete time adaptive control system to the positioning control of manipulators with low reduction joints. First, an adaptive pole assignment system is constructed to use a simplified discrete time model of manipulators which is a nonminimum phase system. Next, the adaptive control system with a zero phase error tracking(ZPET) feedforward compensator is designed to improve the tracking performance. The comparison of the performance of both methods has been made experimentally for a one-link manipulator. Furthermore, a set of experiments has been carried out for a two-degree-of-freedom planar manipulator with a parallelogram mechanism to show the advantages of adaptive control.

Key Words: Adaptive Control, Robotics, Computer Control, Mechatronics, Manipulator, Low Reduction Joints, Digital Control

1. ま え が き

産業用マニピュレータの需要拡大に伴い、マニピュレータに対する期待と要求はますます高度化することが予想される。特に、運転効率向上に対する要求は強く、マニピュレータの運動の高速化は重要な課題の一つである⁽¹⁾。しかしながら、現在市販されている産業用マニピュレータは、ペイロードおよび姿勢変化による影響を小さくするため、高減速かつ操作速度が控えめなものが多い⁽²⁾。

運動の高速化を図るための手法の一つとして減速比を小さくすることがあげられる⁽³⁾。ダイレクトドライブ(DD)方式はその最たる例であり、高速・高精度化という点で最近注目を集めている。DDアクチュエータは、将来的にはマニピュレータ用サーボアクチュエータとして魅力的であるが、現在のところ大きさ、重量、出力トルク、価格の点で、実用化にはまだ問題がある⁽⁴⁾。また、産業用マニピュレータの現状を考慮すれば、DDマニピュレータだけでなく、比較的低減速

な減速機構(関節)を有するマニピュレータの制御を考えることも必要である。しかし、減速比を小さくすればDDマニピュレータ同様、ペイロードや姿勢条件に依存する慣性や重力の変化などの影響を受けやすくなり、制御は困難である⁽⁵⁾。

このような動特性が未知または変動する制御対象に有効な一制御方式として適応制御がある。また、マイクロプロセッサの発達に伴い、サーボ方式は、アナログサーボからデジタルサーボ、ひいてはソフトウェアサーボへと進展しつつあり⁽⁶⁾、離散時間適応制御系のマニピュレータ制御への応用研究は活発化しつつある⁽⁷⁾。しかしながら、DDマニピュレータ制御の場合⁽⁸⁾を除いて、低減速関節を有するマニピュレータの適応制御に関する研究は、まだほとんどないようである。

本研究では、低減速関節を有するマニピュレータに対する適応制御系を構成し、実験を行い、その有用性について検討した。誘導したマニピュレータの離散時間数式モデルが非最小位相系となり、MRACS(モデル規範形適応制御系)手法を適用できないので、まず適応極配置系⁽⁹⁾を構成した。しかし、適応極配置系ではプラントの零点が補償されなく、追従性が劣化する場合があるので、次に、ZPET(零位相誤差追従)前置補償要素⁽¹⁰⁾を付加した適応制御系を構成し、追従性

* 原稿受付 平成3年4月10日。

^{*1} 正員、福岡県工業技術センター機械電子研究所(〒807 北九州市八幡西区則松3-6-1)。^{*2} 正員、九州工業大学情報工学部(〒820 飯塚市大字川津680-4)。

の向上を図った。垂直1リンク形マニピュレータを制御対象とし、実験による両者の比較を行った。さらに、垂直平行四辺形リンク形2自由度マニピュレータに対する実験を行った。その結果、減速比が小さいためペイロードや姿勢変化などの影響を強く受けやすいにもかかわらず、良好な制御性能が得られ、構成した適応制御系の有用性が確認された。

2. 数式モデル

ここでは、マイクロコンピュータを用いた適応制御系を構成するため、多自由度マニピュレータの多入出力離散時間数式モデルを誘導する。

一般に、 n 自由度多関節形マニピュレータの運動方程式は、次式で表せる⁽¹¹⁾。

$$M\{\theta(t), m_p\} \ddot{\theta}(t) + H\{\theta(t), \dot{\theta}(t), m_p\} + V\dot{\theta}(t) + G\{\theta(t), m_p\} = \tau(t) \quad (1)$$

ここで、 $\theta(t) \in R^{n \times 1}$ は関節変位ベクトル、 $\tau(t) \in R^{n \times 1}$ は関節トルクベクトル、 $M \in R^{n \times n}$ は慣性行列、 $H \in R^{n \times 1}$ は遠心力およびコリオリ力を表すベクトル、 $V \in R^{n \times n}$ は粘性摩擦行列、 $G \in R^{n \times 1}$ は重力ベクトルである。また、 m_p はペイロードの質量である。

式(1)の M , H , V および G の変化は適応速度よりも遅く、一定であると仮定し、零次ホールドを前置して式(1)を離散化すると、次式を得る⁽⁷⁾。

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-1}B(z^{-1})[C_M u(k) + f] \quad (2)$$

ここで、

$$A(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 \quad (3)$$

$$B(z^{-1}) = 1 + z^{-1} \quad (4)$$

$$y(k) = \theta(k), \quad y(k) \in R^{n \times 1} \quad (5)$$

$$C_M = 0.5 T^2 M^{-1}, \quad C_M \in R^{n \times n} \quad (6)$$

$$f = -0.5 T^2 M^{-1}(H + V + G), \quad f \in R^{n \times 1} \quad (7)$$

である。ただし、 M は正則であり⁽²⁾、 T はサンプリング周期、 k はサンプリング時点を表す。なお、駆動部である DC サーボ系を含めたマニピュレータの運動方程式は、式(1)と同形である⁽¹²⁾ ことより、式(2)では、制御入力をモータへの入力電圧 $u(k) \in R^{n \times 1}$ とした。また、 $u(k)$ の演算時間遅れを1サンプリング周期とし、式(2)にむだ時間を含めると、

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-2}B(z^{-1})[C_M u(k) + f] \quad (8)$$

となる。以下では、式(8)をマニピュレータの数式モデルとして、離散時間適応制御系を構成する。

3. 適応制御系の構成

式(8)は、 z 平面の単位円上に零点 ($z = -1$) が存在する非最小位相系である。したがって、閉ループの極と制御対象の零点を相殺する MRACS を構成するこ

とはできない。そこで、ここでは、まず、適応極配置系を構成する。次に、追従性の改善を図るために、ZPET を実現する前置補償要素を付加した適応制御系を構成する。

3.1 適応極配置系⁽⁹⁾ いま、閉ループ極を与える漸近安定多項式

$$D(z^{-1}) = A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1})$$

$$d=2 \quad (\text{むだ時間}) \quad (9)$$

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4} \quad (10)$$

$$S(z^{-1}) = 1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} \quad (11)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} \quad (12)$$

を導入すると、出力と規範応答 $x_r(k)$ が

$$\lim_{k \rightarrow \infty} D(z^{-1})\{y(k+d) - x_m(k+d)\} \rightarrow 0 \quad (13)$$

$$x_m(k+d) = B(z^{-1})x_r(k+d)/B(1) \quad (14)$$

を達成する制御入力 $u(k)$ は、次式で与えられる。

$$u(k) = \{1 - S(z^{-1})\}u(k) + C_M^{-1}[\{D(z^{-1})/B(1)\}x_r(k+d) - R(z^{-1})y(k) - C_f a] \quad (15)$$

ここで、 f が一定との仮定より、

$$S(z^{-1})f = S(1)f = C_f a \quad (16)$$

a : 任意定数

とした。しかし、実際には C_M および C_f が未知なので、式(14)においてそれぞれに対応した適応ゲイン行列 $\hat{C}_M(k)$ と $\hat{C}_f(k)$ を導入し、適応制御入力を次式により合成する。

$$u(k) = \{1 - S(z^{-1})\}u(k) + \hat{C}_M^{-1}(k)[\{D(z^{-1})/B(1)\}x_r(k+d) - R(z^{-1})y(k) - \hat{C}_f(k)a] \quad (17)$$

式(8)の両辺に $S(z^{-1})$ をかけると、次式を得る。

$$S(z^{-1})A(z^{-1})y(k) = \Phi^T \xi(k-d) \quad (18)$$

ただし、

$$\Phi^T = [C_M | C_f] = \begin{bmatrix} \Phi_1^T \\ \vdots \\ \Phi_n^T \end{bmatrix} \quad \Phi^T \in R^{n \times (n+1)} \quad (19)$$

$$\Phi_j^T = [C_M^T | C_{fj}] \quad (j=1 \sim n) \quad \Phi_j^T \in R^{1 \times (n+1)} \quad (20)$$

$$\xi(k)^T = [B(z^{-1})S(z^{-1})u(k)^T | B(z^{-1})a] \quad \xi(k)^T \in R^{1 \times (n+1)} \quad (21)$$

である。式(18)に対して次式に示す適応アルゴリズムを用いる。

$$\hat{\Phi}_j(k) = \hat{\Phi}_j(k-1) + \Gamma_j(k-1)\xi(k-d)\epsilon(k)^T \quad (22)$$

$$\Gamma_j(k) = \frac{1}{\lambda_{1j}(k)} \left[\Gamma_j(k-1) - \frac{\Gamma_j(k-1) \xi(k-d) \xi(k-d)^T \Gamma_j(k-1)}{\sigma_j(k) + \xi(k-d)^T \Gamma_j(k-1) \xi(k-d)} \right]$$

$$\Gamma_j(k) \in R^{(n+1) \times (n+1)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\epsilon(k) = \frac{S(z^{-1})A(z^{-1})y_j(k) - \hat{\Phi}_j(k-1)^T \xi(k-d)}{1 + \xi(k-d)^T \Gamma_j(k-1) \xi(k-d)}$$

$$\epsilon(k) \in R^{n \times 1} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ただし,

$$0 < \lambda_{1j}(k) \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_{2j}(k) < 2$$

$$\sigma_j(k) = \lambda_{1j}(k)/\lambda_{2j}(k), \quad \Gamma_j(0) > 0$$

である。

このとき、拡張誤差信号 $\epsilon(k)$ は、 $\lim_{k \rightarrow \infty} \epsilon(k) \rightarrow 0$ となり、 $y(k)$ の $x_m(k)$ への収束性が保証される⁽¹³⁾。なお、ここではマニピュレータのように動作中パラメータが変動する場合に有効な固定トレース法を用いた。

3.2 ZPET⁽¹⁰⁾ 3.1 節で構成した閉ループ系の伝達関数 $G(z^{-1})$ は、

$$G(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{D(z^{-1})} \quad \dots\dots\dots (25)$$

となり、 $B(z^{-1})$ は補償されていない。したがって、 $y(k)$ の $x_r(k)$ への追従性は、 $B(z^{-1})$ に依存する。

そこで、図1に示すように、伝達関数 $W(z^{-1})$ のゲインと位相が、低周波領域から可能な限り高周波領域まで

$$|W(z^{-1})| = 1, \quad \angle W(z^{-1}) = 0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

を満足し、追従性が向上するように、次式の前置補償要素を導入する。

$$F_c(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})B(z)}{[B(1)]^2} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$B(z) = 1 + z \quad \dots\dots\dots (28)$$

このとき、式(25)、(27)および式(28)より、 $W(z^{-1})$ は次式となる。

$$W(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})B(z)}{[B(1)]^2} \quad \dots\dots\dots (29)$$

この伝達関数の周波数特性は、全周波数領域で位相が零、低周波領域で、ゲインはほぼ1となり、式(26)の目的は達成される。

図1 ZPET 前置補償要素を付加した制御系のブロック線図

4. 実験

ここでは、まず、垂直1リンク形マニピュレータを制御対象とし、適応制御実験を行い、その有効性を検討する。さらに、ZPET 前置補償要素の有無による実験結果の比較を行う。次に、垂直平行四辺形リンク形2自由度マニピュレータを制御対象とし、適応制御実験を行い、その有効性を検討する。

4.1 垂直1リンク形マニピュレータ ここで対象とするマニピュレータモデルを図2に示す。 m はリンクの質量、 l はリンクの重心位置、 J はリンクの慣性モーメント、 L はリンクの長さ、 I_p はペイロードの慣性モーメント、 g は重力加速度である。

実験装置の構成を図3に示す。リンクの回転角度は、ロータリエンコーダ(分解能 10 bit)によって検出される。適応アルゴリズムはコントローラであるマイクロコンピュータ NEC PC-9801 RA によって演算される。算出された適応制御入力、D/A 変換器を介してサーボ(電流)アンプによって増幅され、アクチュエータである DC サーボモータ(定格 0.036 N·m)に印加される。DC サーボモータは、減速比 8 のギアを介してリンクを駆動する。リンクは、表1に示す2種類のもの

表1 各リンクの寸法および質量

	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Mass [g]
Link a	143	14	6	25
Link b	65	15	5.5	14

図2 垂直1リンク形マニピュレータ

図3 実験装置の構成

を用いた。

開ループ応答を図4, 5に示す。図5は、リンクが水平方向に移動する場合と鉛直方向に移動する場合の移動角度の増分を比較したものである。なお、図5(b)は、図4の初期位置から反時計方向に移動した場合のものである。通常の産業用マニピュレータは、高減速・高出力であるため、負荷トルクの影響を受けにくい。すなわち、リンクやペイロード条件による重力変化の影響が軽減される構造になっている。図4より、出力平衡後、入力をOFFにすると、重力影響によりリンクがかなり落下していることがわかる。また、図5より、水平方向移動時は重力影響を受けないので $\Delta\theta$ は収束しているが、鉛直方向移動時は、重力影響により $\Delta\theta$ が増加していることがわかる。したがって、本装置は動力伝達要素が低減速であるため、通常の産業用マニピュレータに比べて重力変化の影響を受けやすく、高性能な制御が困難であることがわかる。

前節に示した適応制御系設計パラメータ、適応ゲイン初期値およびサンプリング周期は、以下のように設定し、適応制御実験を行った。

図4 開ループ応答 (Link b $m_p=49\text{ g}$ $u=1.2\text{ V}$)

(a) 水平方向

(b) 鉛直方向

図5 開ループ応答 (Link a $u=3\text{ V}$)

$$D(z^{-1}) = (1 - 0.7z^{-1})(1 - 0.5z^{-1})$$

$$C_M(0) = 0.1, \quad C_f(0) = 0, \quad \text{tr} \Gamma(0) = 0.3$$

$$\sigma(k) = 1, \quad \lambda_1(0) = 1, \quad T = 10\text{ ms}$$

PID 制御実験結果を図6, 適応制御実験結果を図7に示す。PID 制御アルゴリズムは、

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D \{e(k) - e(k-1)\} \quad (30)$$

$$e(k) = x_r(k) - y(k) \quad (31)$$

とした。この結果が、図6(a)であり、良好な性能が得られている。なお、P, I, Dパラメータ K_P, K_I, K_D は、ある程度の試行錯誤により求め、 $K_P=5.3, K_I=0.5, K_D=2.7$ とした。

図6および図7より、PID 制御では、ペイロード条件が図6(b)のように変わると、出力は規範応答に追従できなくなるが、適応制御では、リンクおよびペイロードに関する条件が変化しても、出力が規範応答に良好に追従していることがわかる。

ZPET 補償の有無による図7(d)に示す規範応答への追従性(誤差)の比較を図8に示す。図8より、ZPET 補償を行った場合のほうが、規範応答への追従性が優れていることがわかる。なお、他にいくつか条件を変えて実験を行ったが、図8と同様な結果が得られた。

4.2 垂直平行四辺形リンク形2自由度マニピュレータ ここで対象とするマニピュレータモデルを図9に示す。各パラメータは、図2と同一であり、添字 $i(i=1\sim4)$ はリンク i に関するパラメータであること

(a) Link a $m_p=0\text{ g}$

(b) Link a $m_p=49\text{ g}$

図6 PID 制御実験結果

(a) Link a $m_p=0$ g (b) Link a $m_p=49$ g (c) Link a $m_p=64$ g (d) Link b $m_p=64$ g

図 7 適応制御実験結果

図 8 ZPET 補償の有無による追従性の比較
(Link a $m_p=49$ g)

を意味する。

実験に用いたマニピュレータは、ダイキン工業製ミニチュアロボットであり、実験装置の各関節ごとの構成は、図 3 と同様である。また、平行リンクを構成している各リンクの寸法および質量を表 2 に示す。

本実験で用いた減速機は、図 3 の減速機と同一であるため、開ループ応答は図 4, 5 と同様であり、重力影響やリンク間相互の動的干渉を受けやすく、制御が困難であることが確認されている。

適応制御系設計パラメータ、適応ゲイン初期値およびサンプリング周期は、以下のように設定し、適応制御実験を行った。

$$D(z^{-1})=(1-0.7z^{-1})(1-0.5z^{-1})$$

$$C_M(0)=\text{diag}[0.1 \ 0.1], \quad C_f(0)=[0 \ 0]^T$$

$$\text{tr} \Gamma_i(0)=0.15, \quad \sigma_i(k)=1$$

表 2 各リンクの寸法および質量

	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Mass [g]
Link 1	143	14	6	25
Link 2	82	14	6	14
Link 3	65	15	5.5	14
Link 4	143	15	6	17.5

図 9 垂直平行四辺形リンク形 2 自由度マニピュレータ

図 10 適応制御実験結果 ($m_p=0$ g)

図 11 適応制御実験結果

$$\lambda_{ii}(0)=1 \quad (i=1\sim 2), \quad T=10 \text{ ms}$$

適応制御実験結果を図 10 および図 11 に示す。なお、図 11 は、Link 2 を長さ 158 mm、幅 15 mm、厚さ 12.5 mm、質量 49.5 g のリンクに変えた場合の実験結果である。実験結果より、いずれの場合も規範応答にほぼ良好に追従していることがわかる。

5. あとがき

ここでは、低減速関節を有するマニピュレータの適応制御について考察した。誘導したマニピュレータの離散時間数式モデルが非最小位相系となるため、まず、適応極配置系を構成した。次に、追従性を向上するための ZPET 前置補償要素を付加した適応制御系を構成した。垂直 1 リンク形マニピュレータと垂直平行四

辺形リンク形 2 自由度マニピュレータに対する適応制御実験を行った結果、低減速なためペイロードや姿勢変化などの影響を強く受けやすいにもかかわらず、良好な制御性能が得られ、構成した適応制御系の有効性が明らかとなった。

文 献

- (1) 高野, ロボットの運動の高速化技術, 計測と制御, 21-12 (1982), 1122-1128.
- (2) 富塚, 基礎適応制御理論とロボット制御への応用- I, 日本ロボット学会誌, 3-5 (1985), 473-482.
- (3) 高野, 最近の制御技術のメカニズムへの適用効果, 精密工学会誌, 54-5 (1988), 806-810.
- (4) 浅田, DD ロボットの機構設計, 日本ロボット学会誌, 5-1 (1987), 48-54.
- (5) 小西・ほか 2 名, パラレルリンク形ダイレクトドライブロボットの学習制御, 機論, 55-510, C (1989), 382-388.
- (6) 岩金, アナログサーボからデジタルサーボへ, 日本ロボット学会誌, 7-3 (1989), 212-217.
- (7) Tomizuka, M. and Horowitz, R. Model Reference Adaptive Control of Mechanical Manipulators, *IFAC Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, (1986), 289-295.
- (8) 小野, DD モータの制御系とその特徴, 日本ロボット学会誌, 7-3 (1989), 254-259.
- (9) 藤井・水野, デジタル適応制御の理論と応用, システムと制御, 30-12 (1986), 727-737.
- (10) Tomizuka, M., Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control, *Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 109 (1987), 65-68.
- (11) Paul, R., *Robot Manipulators*, (1981), 157-195, MIT Press.
- (12) 有本, ロボットの力学と制御, (1990), 82-86, 朝倉書店.
- (13) 新中, 適応アルゴリズム, (1990), 11-21, 産業図書.