産業用多関節ロボットの高精度輪郭制御のための 非線形分離に基づく教示信号修正法[†]

中 村 政 俊*・後 藤 聡*・久 良 修 郭**

Accurate Contour Control of Industrial Articulated Robots by Modified Taught Data Method
Based on Nonlinear Separation[†]

Masatoshi NAKAMURA*, Satoru GOTO* and Nobuhiro KYURA**

High accuracy performance of contour control is required for industrial robot arms such as sealing process, laser cutting and so on. This paper describes contour control of articulated robot arms by introducing nonlinear separation control concept. The proposed method consists of nonlinear static compensation of the inverse kinematics and kinematics, and linear dynamics compensation by using the modified taught data method in the joint coordinates. The effectiveness of the proposed method was assured by simulation results and experimental results using an actual industrial robot arm.

Key Words: nonlinear separation control, modified taught data method, contour control, articulated robot, joint coordinates

1. ま え が き

今日、製造工場における少人数化や工業製品の精密化が進む中で、産業界においてロボットの担う役割は大きく、組み立て、塗装、溶接、バリ取り、糊付けなど、様々な用途で産業用ロボットが用いられている。これらの産業用ロボットへの技術的な期待として、作業の高速化と高精度化、ロボットが作業できる空間である作業領域の拡大が上げられる。ロボットの制御に関する研究は精力的になされており、適応制御^{1),2)}やロバスト制御^{3)~7)}など数多くの手法が提案されている。しかし、これらの制御法を産業用ロボットに適用しようとする、現在用いられている産業用ロボットの制御器を作り直す必要があり、容易に利用できるとは言い難い。著者は産業用ロボットの高精度輪郭制御を実現するために教示信号修正法^{8),9)}を過去に提案している。この教示信号修正法は、ロボットへの入力である教示信号として、目標軌道データそのものが与えられている現在の方式を変更し、目標軌道から修正することによって実現される、輪郭制御性能を向上

させる手法であり、ロボットが作業座標系で各座標軸独立の線形モデルで近似できる線形近似可能領域内¹⁰⁾において高精度輪郭制御を行うことができる。しかしながら、線形近似可能領域外、すなわち、ロボットの動作可能領域の限界近くにおける輪郭制御においては、先に提案した教示信号修正法は有効な手法ではなかった。

本研究では、多関節ロボットのすべての動作可能領域で高精度輪郭制御を実現するために、非線形分離制御法¹¹⁾に基づいて制御器を構成する方法を提案する。本方法を用いることによって、多関節ロボットの動作可能領域全域において、高精度輪郭制御が実現される。本方法は教示信号を目標軌道から修正するのみで、既存の産業用ロボットのハード構成を変更することなく高精度輪郭制御が実現されるため、産業界で容易に利用可能である。本方法の有効性をシミュレーションと実機ロボットによる実験結果から確認した。

2. 非線形分離に基づく教示信号修正法

2.1 産業用多関節ロボットの構成と輪郭制御目的

制御を行う上で重要なことは、その制御対象がどのような特性を持っているかをとらえて、その長所を生かして短所を補償することである。本研究における制御対象である多関節ロボットを Fig. 1 に示す。多関節ロボットの軸は設置されている関節の元の軸から順に第1軸、第2軸、第3軸とする。多関節ロボットの作業座標の原点は、第1軸のモータの中心線上と第2軸のモータの中心軸が交わる位置にあり、Fig. 1 のように作業座標系 (p_x, p_y, p_z) と関節座標系 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を

[†] 第15回 SICE 九州支部学術講演会で一部発表 (1996・11)

* 佐賀大学大学院工学系研究科 佐賀市本庄町1

** 近畿大学九州工学部 飯塚市柏の森11-6

* Graduate School of Science and Engineering, Saga University, Saga

** Faculty of Engineering in Kyushu, Kinki University, Iizuka

(Received January 21, 1999)

(Revised October 25, 1999)

Fig. 1 Articulated robot arm

Fig. 2 System structure of the articulated robot arm

とる. 多関節ロボットの制御系の構成を Fig. 2 に示す. 通常, 産業用多関節ロボットは平行リンク機構などを用いて軸間の干渉が極力少なくなるように工夫されており, Fig. 2 に示すように各軸独立に制御系が構成されている. その制御器は位置ループが P 制御, 速度ループが PI 制御が用いられることが多く, 速度ループの PI 制御のなかの I 制御により, 重力や摩擦による定常偏差を補償している¹²⁾. ここで, Fig. 2 中の記号の意味は, (u_x, u_y, u_z) が作業座標系における入力軌道, (u_1, u_2, u_3) が関節座標系における入力軌道, $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ が関節座標系における追従軌道, (p_x, p_y, p_z) が作業座標系における追従軌道である.

産業用ロボットの輪郭制御目的は, あらかじめ与えられる目標軌道にできるだけ正確にロボットを追従させることであり, 産業界の要求は, 目標軌道の高速度とロボットの目標軌道に対する追従精度の高精度化と目標軌道を与える空間 (作業領域と呼ぶ) をロボットの動作可能領域に近づけることである.

2.2 多関節ロボットの輪郭制御方式

多関節ロボットの制御性能を向上させる手法として, 教示信号を目標軌道から修正する手法が考えられる. このような手法として, 我々は先に教示信号修正法^{8), 9)}を提案した. この手法は, 目標軌道を修正要素によって修正した教示信号を用いることによって, 制御対象を目標軌道に追従させる方法である. 教示信号修正法は, ロボットのダイナミクスを作業座標系において各座標軸独立に線形モデルで表現することができる領域である線形近似可能領域¹⁰⁾で輪郭制御性能を向上させることはできるが, 線形近似可能領域外では有効な手法ではなかった.

そこで, 目標軌道からの修正を作業座標系で行うのではなく, 関節座標系において行うことによって, ロボットの動作

Fig. 3 Modified taught data method in the joint coordinates

可能領域すべてにおいて高精度輪郭制御が実現できる手法を提案する. すなわち, Fig. 3 に示すように, 関節座標系において修正要素を組み込み, 関節座標系の目標軌道を修正する. ここで, Fig. 3 中の記号は (r_x, r_y, r_z) が作業座標系における目標軌道, (r_1, r_2, r_3) が関節座標系における目標軌道である. この関節座標系で教示信号修正法を適用する試みが本研究における方法の特徴である. これは非線形特性を持つ制御対象に対して, 非線形の静特性と線形の動特性に分離してモデル化し, 非線形の静特性はその逆システムで補償し, 線形の動特性には既存の線形制御理論を用いるという, 我々が提案している非線形分離制御法¹¹⁾の考え方に基づくものである.

2.3 修正要素の設計

関節座標系 (p_x, p_y, p_z) を作業座標系 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ に変換するキネマティクスは, Fig. 1 の幾何学的関係から

$$l = l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$p_x = l \cos \theta_1 \quad (2)$$

$$p_y = l \sin \theta_1 \quad (3)$$

$$p_z = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (4)$$

となる. つぎに, ダイナミクスについて考えると, 産業用ロボットの輪郭制御時における動作速度は定格速度の 1/5 程度以下であり, コリオリ力が問題となるような高速の動作領域で動作させることはない. また, 軸干渉は極力生じないように工夫されており, 動作速度も軸干渉の影響が生じるような高速動作をさせないため, これを無視することができる. そこで, 産業用ロボットのダイナミクスは, 各軸独立に

$$\Theta_i(s) = \frac{K_p K_v}{s^2 + K_v s + K_p K_v} U_i(s), \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

と表すことができる^{9), 13)} (Fig. 4 参照). 産業用ロボットでは位置ループゲイン K_p と速度ループゲイン K_v は各軸すべて等しくなるように調節されているため, (5) 式ではすべての軸について等しく K_p, K_v とおく. この (5) 式の 2 次モデルは, 位置ループが P 制御で速度ループが PI 制御である産業用ロボット全体をモデル化したものであり, 速度ループの I 制御と重力や摩擦などによる外乱とが相殺された後の特性を表わしている¹⁴⁾.

つぎに, 関節座標系における修正要素 $F(s)$ の設計手法について説明する. この設計手順は先に提案している作業座標系における教示信号修正法と全く同じである⁹⁾. 先程も述べたように, 産業用ロボットでは各軸のダイナミクスが等しくなるようにサーボパラメータ K_p, K_v が調整されているため, 関節座標における教示信号修正法の修正要素 $F(s)$ の導

Fig. 4 Dynamics of each axis

出の際には、1つの軸についてのみ行えば、他の2つの軸についても全く同じとなる。関節座標における1つの軸の目標軌道を $r(t)$ 、入力軌道を $u(t)$ 、出力軌道を $\theta(t)$ と定義する。Fig. 3の中の記号との対応は、 $r(t)$ が各軸の $r_i, i=1,2,3$ に対応、 $u(t)$ が各軸の $u_i, i=1,2,3$ に対応、 $\theta(t)$ が各軸の $\theta_i, i=1,2,3$ に対応する。

理想的な制御性能 $\Theta(s) = R(s)$ 、すなわち、多関節ロボットの出力が目標軌道と一致するためには、修正要素 $F(s)$ は多関節ロボットの逆ダイナミクス $G^{-1}(s)$ であることが要求される。しかし、修正要素を $F(s) = G^{-1}(s)$ と設計することは、逆ダイナミクス $G^{-1}(s)$ がプロパーでなくなるため、目標軌道が微分不可能である場合には教示信号が発散する。そこで、メカトロサーボ系を状態空間表示し、極配置レギュレータと最小次元オブザーバを用いて、修正後のメカトロサーボ系 $F(s)G(s)$ が望ましい閉ループ制御系となるように修正要素 $F(s)$ を設計する⁹⁾。

まず、ロボットのダイナミクス(5)式を仮定 $d^2r(t)/dt^2 + K_v dr(t)/dt \approx 0$ を導入して状態空間表示すると

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + Bu^*(t) \quad (6)$$

$$q(t) = Cp(t) \quad (7)$$

となる。ここで

$$A = \begin{pmatrix} -K_v & 1 \\ -K_p K_v & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ K_p K_v \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

であり、状態変数は

$$p(t) = \begin{pmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) + K_v q(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$q(t) = \theta(t) - r(t), \quad u^*(t) = u(t) - r(t) \quad (12)$$

と定義する。状態変数 $p(t)$ が0になると、 $q(t) = \dot{q}(t) = 0$ となり、関節座標系における目標軌道である $r(t)$ と出力である $\theta(t)$ が一致するので、 $p(t)$ を0に近づけるように $F(s)$ を設計する。

ロボットのダイナミクスを(6)～(12)式の状態空間表示するために導入された仮定 $d^2r(t)/dt^2 + K_v dr(t)/dt \approx 0$ について考える。仮定の中の $r(t)$ は目標軌道であるため、

$d^2r(t)/dt^2 + K_v dr(t)/dt$ は一般には0にはならない。この仮定を満足する目標軌道の動きであれば、状態空間表示でロボットのダイナミクスを完全に表現することができるが、この仮定が成り立たない場合には、状態空間表示できない部分について補償するために、通常、レギュレータ理論ではなく、積分器を追加してサーボ理論を適用する。しかしながら、本問題においてサーボ理論を適用すると、目標軌道に対する追従性は向上するが、停止時などにおいてオーバーシュートが生じてしまう。産業用ロボットの輪郭制御においては、位置制御系としてのオーバーシュートは決して生じさせてはならない。ある種の加工に際し、位置のオーバーシュートを生じさせることは、形状に対し致命的な欠陥を与えることになる。たとえば、シャフトの加工における段付き部分を考えてみると、オーバーシュートが生じると、ちょうど段付きの部分で本来の寸法よりもできあがりの直径が小さめとなる。このことは、その部分の強度が大幅に低下することを意味している。これは、あまり目標軌道に対する追従性を良くして目標軌道に添ってロボットを動作させようとする、ロボットのダイナミクスの限界から、結果的に良好な制御性能を得ることができないことを意味する。そこで、教示信号修正法の導出においては、サーボ理論は適用せずに、仮定が成り立つものとして、(6)～(12)式にそのままレギュレータ理論を適用する。文献9)では、レギュレータ理論を用いた教示信号修正法によって特性が大幅に改善されることを、周波数領域と時間領域から解析している。

多関節ロボットの状態空間表示(6)式に対して、極配置レギュレータと最小次元オブザーバを適用する。極配置レギュレータは

$$u^*(t) = (f_1 \quad f_2)\hat{p}(t) \quad (13)$$

$$f_1 = 1 - \frac{K_v}{K_p} - \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{K_p} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{K_p K_v}$$

$$f_2 = \frac{1}{K_p} + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{K_p K_v}$$

と表される。ここで、 $\gamma_1, \gamma_2 (< 0)$ はレギュレータの極である。また、最小次元オブザーバは

$$\frac{dz(t)}{dt} = \mu z(t) - (K_p K_v + \mu K_v + \mu^2)q(t) + K_p K_v u^*(t) \quad (14)$$

$$\hat{p}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} z(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ -\mu \end{pmatrix} q(t) \quad (15)$$

となる。ここで、 $\mu (< 0)$ はオブザーバの極である。 $\hat{p}(t)$ を(13)式に代入することにより、操作量 $u^*(t)$ は

$$u^*(t) = (f_1 - \mu f_2)q(t) + f_2 z(t) \quad (16)$$

と導出される。修正要素 $F(s)$ を得るために、(12)、(14)式と(16)式を周波数領域に変換すると

$$Q(s) = \Theta(s) - R(s), \quad U^*(s) = U(s) - R(s) \quad (17)$$

$$Z(s) = \frac{-K_p K_v - \mu K_v - \mu^2}{s - \mu} Q(s)$$

$$+ \frac{K_p K_v}{s - \mu} U^*(s) \quad (18)$$

$$U^*(s) = (f_1 - \mu f_2)Q(s) + f_2 Z(s) \quad (19)$$

となる。(18) 式を (19) 式へ代入すると、 $U^*(s)$ と $Q(s)$ の関係

$$U^*(s) = \frac{(s - \mu)f_1 - (\mu s + K_p K_v + \mu K_v)f_2}{s - \mu - f_2 K_p K_v} Q(s) \quad (20)$$

が得られる。(17) 式と (20) 式から、 $U(s)$ は $R(s)$ と $\Theta(s)$ により

$$U(s) = \{1 - T(s)\}R(s) + T(s)\Theta(s) \quad (21)$$

と与えられる。ここで

$$T(s) = \frac{(s - \mu)f_1 - (\mu s + K_p K_v + \mu K_v)f_2}{s - \mu - f_2 K_p K_v} \quad (22)$$

である。目標軌道 $R(s)$ とメカトロサーボ系の追従軌道 $\Theta(s)$ の関係は、(21) 式と $\Theta(s) = G(s)U(s)$ から

$$\Theta(s) = \frac{G(s)\{1 - T(s)\}}{1 - G(s)T(s)} R(s) \quad (23)$$

となる。最終的に、修正要素 $F(s)$ は、(23) 式から

$$F(s) = \frac{1 - T(s)}{1 - G(s)T(s)} \quad (24)$$

と導出される。 f_1 と f_2 を代入すると、修正要素 $F(s)$ はレギュレータの極 μ_1, μ_2 、オブザーバの極 γ とサーボパラメータ K_p, K_v を用いて

$$F(s) = \frac{h_3 s^3 + h_2 s^2 + h_1 s + h_0}{(s - \mu_1)(s - \mu_2)(s - \gamma)} \quad (25)$$

あるいは時間領域で

$$\begin{aligned} u^{(3)}(t) + d_2 \ddot{u}(t) + d_1 \dot{u}(t) + d_0 u(t) \\ = h_3 r^{(3)}(t) + h_2 \ddot{r}(t) + h_1 \dot{r}(t) + h_0 r(t) \end{aligned} \quad (26)$$

と与えられる。ここで

$$\begin{aligned} h_0 &= -\mu_1 \mu_2 \gamma \\ h_1 &= (K_v + \gamma)(\mu_1 + \mu_2) + K_v^2 + \mu_1 \mu_2 + K_v \gamma \\ &\quad - \frac{\mu_1 \mu_2 \gamma}{K_p} \\ h_2 &= \frac{1}{K_p} \{ (K_v + \gamma)(\mu_1 + \mu_2) + K_v^2 + \mu_1 \mu_2 + K_v \gamma \} \\ &\quad - \frac{\mu_1 \mu_2 \gamma}{K_p K_v} \\ h_3 &= \frac{1}{K_p K_v} \{ (K_v + \gamma)(\mu_1 + \mu_2) \\ &\quad + K_v^2 + \mu_1 \mu_2 + K_v \gamma \} \\ d_0 &= -\mu_1 \mu_2 \gamma \\ d_1 &= \mu_1 \mu_2 + \mu_1 \gamma + \mu_2 \gamma \\ d_2 &= -(\mu_1 + \mu_2 + \gamma) \end{aligned}$$

である。

教示信号修正法におけるレギュレータの極 μ_1, μ_2 とオブザーバの極 γ は制御性能に大きく影響を与える。これらのパラメータの選定は、以下に述べる条件を満足する中で、負値の絶対値を大きくするように設定する。最初の条件は、サーボモ-

タの操作量制限(入力電流の制限)を満足することである。これは、教示信号修正法が(5)式の2次モデルの下で導出されているため、操作量制限を満たさないと、ロボットアームのダイナミクスを2次モデルで表現できなくなるためである。つぎの条件は、レギュレータの極の最大値で代表される修正後の系全体の時定数が、制御器のサンプリング時間間隔の10倍以上となる必要があることである。これは、系の特性を向上させるために系全体の時定数を上げると、修正後の教示信号の形状の時間変化が大きくなり、サンプリング時間間隔でサンプリングすると、形状が崩れて適切な修正の効果が得られなくなるためである。最後の条件として、 $\min(\mu_1, \mu_2) > \gamma$ を満足する必要がある。これは、レギュレータの極よりもオブザーバの極の方が早く収束する必要があるという条件¹⁵⁾からである。

作業座標系 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を関節座標系 (p_x, p_y, p_z) に変換する逆キネマティクスは

$$c = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - l_1 \quad (27)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \quad (28)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{c}{p_z} \right) \mp \cos^{-1} \left(\frac{l_2^2 - l_3^2 + c^2 + p_z^2}{2l_2 \sqrt{c^2 + p_z^2}} \right) \quad (29)$$

$$\theta_3 = \pm \pi \mp \cos^{-1} \left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - c^2 - p_z^2}{2l_2 l_3} \right) \quad (30)$$

で表される。ここで、符号は複号同順であり、作業座標系で1点を表すのに、関節座標系では2通りあることを意味する。

Fig. 3 に示す制御器全体の構成図に従って信号の流れを説明すると、作業座標系 (r_x, r_y, r_z) で与えられる目標軌道を、逆キネマティクス(27)式から(30)式を用いて関節座標系 (r_1, r_2, r_3) に変換する。この関節座標系に変換された目標軌道を(26)式で示される修正要素で修正することにより、 (u_1, u_2, u_3) を計算する。この信号をキネマティクス(1)式から(4)式を用いて作業座標系 (u_x, u_y, u_z) に変換し、ロボットに入力する。このようにすることで、Fig. 3 の中の制御器の中のキネマティクスと多関節ロボットアームの逆キネマティクスが相殺され、関節座標系において修正要素を働かせることができる。

提案した関節座標系における教示信号修正法は、(1)～(4)、(26)、(27)～(30)式全体で見ると非線形制御補償器となっているが、その中身を見ると、非線形スタティクス補償((1)～(4)式、(27)～(30)式)と線形ダイナミクス補償((26)式)に分離して構成されていることがわかる。

3. 非線型分離に基づく教示信号修正法の検証

3.1 多関節ロボットの特性把握

前節で提案した非線型分離に基づく教示信号修正法を5関節を持つ多関節型ロボット(Performer-MK2, 八幡電機精工製)に適用し、その有効性を確認した。実験の際には、3次

Fig. 5 Movable region of robot arm at $y=0$ [mm]

元空間を移動するのに必要な第1～3軸までを対象とした。Performer-MK2の第1軸の長さ l_1 は0.1[m]、第2軸の長さ l_2 は0.27[m]、第3軸の長さ l_3 は0.23[m]である。

まず Fig. 4 において、位置ループを外し速度ループのついた状態で、ロボットの各軸のステップ応答、すなわち、一定速度の入力指令を与え、その応答を測定することで、各軸の速度ループゲイン K_v を導出する。ここで、一定速度の入力を用いているのは、産業応用の立場では、モータの動作が一定速度である場合が多く、実際の作業状況と同じ状況でロボットの動特性を測定するためである。ロボットを動作させる場合には、各軸のサーボモータのトルク出力に飽和が生じない状態で動かす必要があるため、トルク飽和が生じない程度の速度入力として、動作速度を定格速度50[rev/s]の1/10である5[rev/s]を与えた。また、実験に際しては、静止摩擦の影響を排除するために、測定する軸のモータに微小なバイアス電圧0.01[V]（速度0.1[rev/s]相当）を与えた。ロボットのアームは垂直に立てた状態でステップ応答を測定し、そのときのサンプリング時間は600[μs]とした。このステップ応答の実験結果から時定数0.0066[s]が読みとられ、その逆数が K_v となるので、 $K_v = 150$ [1/s]と計算された。

位置ループゲインに関しては、計算機内で任意に設定することが可能となっており、 $K_p = 10$ [1/s]と設定した。第1軸以外の第2軸、第3軸に関しても同様にして速度ループゲインを求めた結果、ほぼ等しい値となったため、1～3軸すべて同じ値 $K_v = 150$ [1/s]とし、位置ループゲインは $K_p = 10$ [1/s]と設定した。このパラメータに基づいて、関節座標系における教示信号修正法を適用した結果を次節で述べる。

3.2 非線型分離に基づく教示信号修正法による輪郭制御実験

動作速度を75[mm/s]として、直交する軌道((120,0,450) → (150,0,450) → (150,0,430) 単位[mm])を描かせた場合 (Fig. 5の線形近似可能領域内参照) において、提案法（修正要素が関節座標系で働く）の場合、修正要素を作業座標系で組み込んだ場合⁹⁾、産業界で広く用いられている目標軌道を修正なしに教示信号に用いる従来法の場合の3通りの手法でのシミュレーション結果および実験結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は手法の違いが明確になるように角の付近で拡大して

いる。また、線形近似可能領域は、作業座標系における1点に対して(27)～(30)式で表される2通りの姿勢のいずれの場合においても、作業座標系で各座標軸独立の線形モデルで表現できる領域を示している¹⁰⁾。

修正要素 $F(s)$ の極の値は、作業座標系と関節座標系どちらの場合にも $\mu_1 = \mu_2 = -50$ 、 $\gamma = -100$ と与えた。実験のサンプリング間隔は、位置ループの時定数40[ms]の1/5以下として1[ms]と与えた¹⁶⁾。Fig. 6中の教示信号を見ると、教示信号修正法では、作業座標系における修正と関節座標系における修正ともに、角の部分で指令を延長しており、遅れを補償していることがわかる。追従軌跡を見ると、従来法では角の部分でシミュレーション結果と実験結果で30[mm]程度の誤差が発生しているのに対して、教示信号修正法を適用すればシミュレーション結果で8[mm]程度、実験結果で9[mm]程度と著しく制御性能が改善されていることがわかる。また、この軌道では、作業座標系における修正と関節座標系における修正は教示信号がほぼ一致しているため、シミュレーション結果、実験結果ともにほぼ一致している。

3.3 輪郭制御の作業領域の拡大

通常ロボットの輪郭制御は、線形近似可能領域内に限って使用するが、本提案法によれば、ロボットのすべての動作可能領域で使うことができることを示す。目標軌道を線形近似可能領域外の直交する軌道((550,0,100) → (580,0,100) → (580,0,70) 単位[mm])を描かせた場合 (Fig. 5の線形近似可能領域外参照) において、実験結果を Fig. 7 に示す。目標軌道以外の条件は前節と同じである。Fig. 7の結果を見ると、基本的には Fig. 6の結果と同様に従来法と比較して教示信号修正法が目標軌道に近く、良好な結果が得られている。Fig. 7の結果を詳しく見ると、教示信号は作業座標系における修正と関節座標系における修正とを比較すると、わずかながら関節座標系における修正量が小さくなっている。計算機シミュレーション結果および実験結果において、教示信号の違いを反映して、作業座標系による修正ではわずかにオーバーシュートが生じているが、関節座標系による修正では生じていない。

また、この領域よりもさらに動作可能領域の限界に近づけようとするとき、作業座標系における教示信号修正法では Fig. 7の教示信号が作業領域から外れてしまい、多関節ロボットに教示すること自体が不可能となる。関節座標系における教示信号修正法では、関節座標系において目標軌道から修正を加えるため、修正後の教示信号も動作可能領域から逸脱することなく、動作可能領域すべてにおいて手法を適用することができる。

作業座標系における教示信号修正法が適用できるような領域においては、作業座標系における修正と関節座標系における修正では目に見えて顕著な違いはないが、作業座標系における教示信号修正法が適用できるのは動作可能領域すべてではないのに対して、関節座標系における教示信号修正法では動作可能領域すべてに対して手法を適用でき、その制御性能

Fig. 6 Results of contour control inside of linearizable region (joint: modification in the joint coordinates, working: modification in the working coordinates, conventional: no modification, objective: objective trajectory)

Fig. 7 Results of contour control outside of linearizable region (joint: modification in the joint coordinates, working: modification in the working coordinates, conventional: no modification, objective: objective trajectory)

は従来法と比較して目標軌道に近づけることができるため、多関節ロボットの輪郭制御に有効な手法である。

4. ま と め

多関節ロボットの特性に基づいてキネマティクスと逆キネマティクスの非線形変換と線形ダイナミクスを補償することによって、ロボットの全動作可能領域で高精度輪郭制御を実現する手法を提案した。本方法の有効性をシミュレーションと実機ロボットによる実験結果から確認した。本手法は、既存のロボットのハードを全く変更することなしに、従来の指令から教示信号払い出しのところに教示信号を修正する部分を追加するだけでロボットの高精度輪郭制御を全動作可能領域に拡大することができ、産業用ロボットの利用範囲を大幅に改善拡張できる。

本研究を進めるに当たって、計算機シミュレーションおよび実験にご協力頂いた佐賀大学学生塚原 潔君、深田豊治君、青木重人君、小畑昌之君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) R. Ortega and M. W. Spong: Adaptive motion control of rigid robots: a Tutorial, *Automatica*, **25**-6, 877/888 (1989)
- 2) J. J. E. Slotine and W. Li: Composite adaptive control of robot manipulators, *Automatica*, **25**-4, 509/519 (1989)
- 3) S. W. Wijesoma and R. J. Richards: Robust trajectory following of robots using computed torque structure with VSS, *Int. J. Control*, **52**-4, 935/962 (1990)
- 4) Z. Qu and J. Dorsey: Robust tracking control of robots by a linear feedback law, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-36**-9, 1081/1084 (1991)
- 5) R. Shoureshi, M. E. Momot and M. D. Roesler: Robust control for manipulators with uncertain dynamics, *Automatica*, **26**-2, 353/359 (1990)
- 6) D. M. Dawson, Z. Qu, F. L. Lewis and J. F. Dorsey: Robust control for the tracking of robot motion, *Int. J. Control*, **52**-3, 581/595 (1990)
- 7) C. Y. Kuo and S. P. T. Wang: Robust position control of robotic manipulator in Cartesian coordinates, *IEEE Trans. Robotics Automat.*, **RA-7**-5, 653/659 (1991)
- 8) 後藤, 中村, 久良: ロボットアームの高速高精度位置決めのための教示信号修正法, 計測自動制御学会論文集, **27**-12, 1396/1404 (1991)
- 9) 中村, 後藤, 久良: メカトロサーボ系制御, 森北出版, **34**/42, 134/148 (1998)
- 10) 後藤, 中村, 久良: 産業用多関節ロボットアーム制御系の線形モデルの近似誤差の評価とモデルの妥当性, システム制御情報学会論文誌, **7**-3, 103/112 (1994)
- 11) M. Nakamura, S. Goto and T. Sugi: A methodology for designing controllers for industrial systems based on nonlinear separation model and control, *Control Engineering Practice*, **7**-3, 347/356 (1999)
- 12) 郷, 中村, 後藤, 久良: 産業用メカトロサーボ系の輪郭制御

性能に着目したモデル構成とサーボパラメータ決定法, 精密工学会誌, 64-8, 1158/1164 (1998)

- 13) 安川電機製作所: メカトロニクスのためのサーボ技術入門, 日刊工業新聞社 (1986)
- 14) 後藤, 中村, 鄒, 久良: 産業用メカトロサーボ系の動作速度に応じた低次元モデル構成, 精密工学会誌, 65-6, 815/819 (1999)
- 15) 小郷, 美多: システム制御理論入門, 実教出版 132 (1979)
- 16) 中村, 香田, 久良: サーボ系による連続経路制御のサンプル値制御における適正サンプル周波数の決定法, 計測自動制御学会論文集, 28-5, 649/651 (1992)

[著者紹介]

中村 政 俊 (正会員)

1943年8月20日生。73年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手, 74年佐賀大学講師, 75年同助教授, 88年同教授, 98年同大学院工学系研究科教授。現在に至る。工学博士。システム制御の理論と応用の研究に従事。1997年計測自動制御学会フェロー, 電気学会, 電子情報通信学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本脳波・筋電図学会, 日本ME学会, IEEE学会等の会員。

後 藤 聡 (正会員)

1966年1月1日生。90年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士前期課程修了。同年佐賀大学理工学部電気工学科助手, 96年同講師, 98年同大学院工学系研究科助教授。現在に至る。工学博士。主としてメカニカルシステム制御の研究に従事。電気学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本精密工学会の会員。

久 良 修 郭 (正会員)

1942年2月12日生。66年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)安川電機入社, 研究所, 技術開発センター, メカトロ研究所所長を経て, 現在技術開発本部担当顧問, 95年から近畿大学九州工学部教授併任。工学博士。電気学会, 日本ロボット学会等の会員。