関節形ロボットの自律的な制御

花 房 秀 郎*・吉 川 恒 夫*・中 村 仁 彦*

Autonomous Contouring Control of an Articulated Robot

Hideo HANAFUSA*, Tsuneo YOSHIKAWA* and Yoshihiko NAKAMURA*

Contouring control of a robot arm is a significant problem in many manufacturing processes, such as arc-welding, sealing, painting, shape measuring and various inspections. For this control play-back control has been applied so far. But it has following inherent problems.

- i) Play-back control requires much time and labour in the teaching process.
- ii) Play-back control system cannot adapt itself to setting errors and to individual differences of objects.
- iii) Control performance depends directly upon the operator's teaching ability and upon how accurately objects are placed.

We proposed Autonomous Contouring Control of a robot arm in order to overcome those problems. In this control the robot system obtains the information about the position and the shape of the object using the sensors attached to the robot hand.

In this paper we analyzed the basic characteristic of Autonomous Contouring Control System in two dimensional case. Based upon the analysis we proposed a scheme for the control system design. And then applying the scheme to an articulated robot arm driven by hydraulic cylinders, we verified its effectiveness for contouring control of unknown curves by experiments.

Keyword: articulated robot arm, contouring control, autonomous system, sensory control, hydraulic servo system

1. 緒 言

自律的な制御とは、ロボットが手先に取り付けられたセンサによって自ら対象物を認識し、その信号

に基づいて、位置や形状の未知な対象物をならう機能をもつ制御である。

この制御系は環境の変化に対して適応性をもつ知能ロボットの制御系として興味深いだけでなく、従来の産業用ロボットのプレイバック制御方式に内在する

- i) 作業教示に多くの時間と労力を要する、
- ii) 据え付け誤差に対する適応力に欠ける、
- iii) 制御性能が教示者の教示能力や据え付け精度に直接関係する。

などの欠点を解決し、ロボットの応用分野をさらに広げる可能性をもっている。

産業用ロボットのなない制御については、溶接、溶断、シーリング、塗装、形状計測や各種検査など応用範囲が広いことから、数多くの報告がなされている。それらは作業時においてロボットに与える目標値と実際の対象物との関係によって、つぎの3方式に分類できよう。

第1の方式はあらかじめティーチング^{1)~3)}あるいは数値計算⁴⁾によって得た目標値を記憶し、作業時にそれを時間の関数として指令する制御方式である。プレイバック制御方式などがこれに含まれる。

第2の方式はあらかじめ与えられた目標軌道の情報とセンサ情報を混在させ対象物に対してある程度の適応力をもたせた制御方式である。これには目標軌道の情報に基づいて前もって計算・記憶したゲイン行列でセンサ信号を分解する方法⁵⁾や時間関数の目標値とセンサ信号を重畳させる方法⁶⁾などが報告されている。

第3の方式は作業時にロボットが自ら検出したセンサ信号だけを目標軌道に関するフィードバック信号とする自律的制御方式である。これには各種センサの開発を主題とした研究^{7)~9)}や、形状計測を目的としたセンサ信号利用アルゴリズムの研究¹⁰⁾などがある。しかしこれらの研究は自律的制御方式の、いわばセンサの側からのアプローチであり、このような制御方式の本質を追求した研究ではない。自律的な系の動作の基礎研究としては、工作機械の2次元なない機構につ

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto
(Received March 24, 1982)
(Revised August 9, 1982)

いて論じた花房、清水¹¹⁾の研究がある。

本報では、問題を2次元の場合に絞り、関節形ロボットの自律的な制御系の構造的特徴の解析と制御系の設計について考察する。はじめに、対象物とロボットの手先との相対速度、相対間隔、相対的傾きの情報を検出するセンサを仮定し、これを用いた自律的な制御系の特徴を明らかにし、制御装置のとりべき構造の概略を明らかにする。ついで、制御装置の詳細設計を行い、制御系構成の容易化のために動特性の補償と運動学的特性の補償が分離できる設計法を提案する。最後に試作したセンサを用いて自律的な制御系を実際に構成し、3自由度関節形ロボットに未知形状対象物のならい作業を行わせる実験を行い、提案した自律的な制御系設計法の有効性を検討する。

2. 自律的な制御系の構造

Fig. 1 にロボットの手先に取り付けられたセンサと対象物との関係を示す。センサの指向方向を表す軸をセンサ軸、センサ軸と対象物面との交点を参照点と呼ぶことにする。センサは参照点が対象物面上を移動する速度、および手先と参照点間の距離を検出するものとして解析する。

ならい作業では通常、仕様は図のならい間隔、ならい角度、ならい速度で表わされる。これは作業の進行に伴って移動する座標系に基づく作業記述と考えられる。ここではこの作業仕様を記述する座標系を操作変数座標系¹³⁾と呼ぶことにする。またセンサ座標系はセンサの指向方向を基準にして作られた座標系であ

Fig. 1 Specification of contouring tasks

Fig. 2 Three coordinate systems

り、センサ信号はこの座標系で記述される。

Fig. 2 は特性表示のための3種類の座標系を示すものである。 $O_x-x_1x_2$ は絶対座標系 (x 座標系), $O_p-p_1p_2$ はセンサ座標系 (p 座標系), $O_q-q_1q_2$ は参照点を原点とする操作数座標系 (q 座標系) である。

p 座標系の p_1 軸はセンサ軸の方向にとり、 q 座標系の q_1 軸は対象物表面の法線方向にとる。また $x_H = \text{col.}(x_{H1}, x_{H2})$ および $q_H = \text{col.}(q_{H1}, q_{H2})$ はそれぞれ x 座標系、 q 座標系で表わされた手先位置であり、 $x_R = \text{col.}(x_{R1}, x_{R2})$ および $p_R = \text{col.}(p_{R1}, p_{R2})$ はそれぞれ x 座標系、 p 座標系で表わされた参照点位置である。これらの座標系の関係を表わすために、原点が一致するように平行移動したときの x 座標系と p 座標系の回転角度を α 、 p 座標系と q 座標系の回転角度を β とすると、これらの関係は次式で表わされる。

$$p_R = P \Delta x_R \quad (1)$$

$$q_H = -Q p_R \quad (2)$$

ただし

$$\Delta x_R \triangleq x_R - x_H,$$

$$P \triangleq \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad Q \triangleq \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$$

センサから得られる信号 p_s は p 座標系によってつぎのように表わすことができる。

$$p_s = A_1 P \tilde{x}_R \quad (3)$$

ただし

$$A_1 \triangleq \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P \triangleq \begin{pmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{pmatrix}, \quad \tilde{x}_R \triangleq \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \dot{x}_R \end{pmatrix}.$$

一方、ならい作業の仕様は、一般に q 座標系に基づくつぎのベクトル q_s によって記述される。

$$q_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_H \\ Q P \dot{x}_R \end{pmatrix} \quad (4)$$

(3), (4) 式より $p_{R2} = 0$ を考慮すると p_s と q_s の関係を与える次式を得る。

$$q_s = A_2 \bar{Q} A_1^T p_s \quad (5)$$

ここで

$$A_2 \triangleq \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \bar{Q} \triangleq \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & Q \end{pmatrix}.$$

以上の関係をもとに、 $q_s = q_s^0$ によってその作業仕様が与えられるならい制御系の構成をブロック図で示したのが Fig. 3 である。ならい制御系はロボット、センサ、制御装置の3要素に大きく分けられる。

Fig. 3 Block diagram of autonomous contouring control system

センサのブロックでは、ロボットの手先の位置・姿勢と対象物の位置・形状の情報に基づいて系全体が自ら参照点を選び出し、センサ信号 p_s を発生する。

制御装置は、(5)式に基づいて p_s を q_s に変換する座標変換器、および作業仕様との偏差 $q_s^0 - q_s$ から、ロボットの動特性を考慮して手先の協調運動を合成するように各アクチュエータ・ドライバの入力 v を生成する特性補償器からなる。

Fig. 3 より、センサ信号から対象物に関する情報を得て作業を行うための制御系は、つぎのような構造的特徴をもつ。

i) ロボットの手先の運動に関する直接の目標値は対象物を含む系全体が参照点として自ら作り出している。これはプレイバック制御方式などの非自律的制御方式が、作業仕様に基づいて教示・計算された目標値を、作業時には対象物と無関係に外部からロボットに指令する構造をなしているのと本質的に異なっており、自律的な制御と呼ぶゆえんである。

ii) 非自律的な制御系における目標値に替るものとして、より高級な目標値である作業仕様が直接、比較の対象として取り込まれている。これは制御系としてより望ましい構造である。

3. 制御装置の設計

3.1 動特性と運動学的特性の分離補償

関節形ロボットの運動方程式は一般に次式で表わされる。

$$A(\theta)\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) + f(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (6)$$

ここで $\theta, b, c, f, A \in R^n$, $A \in R^{n \times n}$ であり θ は関節角度、 τ は関節トルクである。 A は慣性行列、 b, c, f はそれぞれコリオリ力・遠心力、重力、摩擦力の効果を表わしている。さらにロボットの駆動装置への入力 v と関節トルク τ の間には、たとえば、電動モータの電機子インダクタンス、油圧駆動系の配管のコンプライアンスや油の圧縮性、あるいは減速機構のコンプライアンスなどが存在し、これらの駆動系の動特性をも含めた全体の特性は3次系として記述される。(6)式には A, b, c などの非線形項が存在するが、実際の

制御では計算機を用いて目標値や制御装置のパラメータを逐次更新する方式を用いるので、サンプリング期間内の運動は基準点 θ_0 の近傍での微小変化に対し(6)式を線形に近似すると駆動系を含めた全体の特性は一般につぎのように表わされる。

$$A_0(\theta_0)\ddot{\theta} + B_0(\theta_0)\dot{\theta} + C_0(\theta_0)\theta = v \quad (7)$$

ここで $A_0, B_0, C_0 \in R^{n \times n}$ は基準角 θ_0 での定係数行列であり、 $v \in R^n$ は基準状態における(6)式の定数項に対応する部分を除いた変化分の制御量である。以下では2次元ならい問題に絞って議論を進めるため、位置の自由度2と姿勢の自由度1を合せて $n=3$ とする。

センサ信号を q 座標に変換した q_s には位置と速度の情報が混在している。ここでは問題を単純にするために、 $\Delta q_s = q_s^0 - q_s$ のうちならい速度の成分を実時間スケールで積分して $\Delta q_s^* = q_s^{0*} - q_s^*$ とし、ならい方向の位置の偏差として扱う。

$$q_s^* = \begin{pmatrix} q_H \\ l \end{pmatrix}, \quad l \triangleq \int_0^t (0 \ 1) Q P \dot{x}_R dt \quad (8)$$

特性補償器の役割は、(7)式で表わされるロボットと特性補償器を含む閉ループ系を

$$A_1 \ddot{q}_s^* + B_1 \dot{q}_s^* + C_1 q_s^* = \Delta q_s^* \quad (9)$$

となるように補償することである。ここで $A_1, B_1, C_1 \in R^{3 \times 3}$ は、(9)式が安定で作業目的にかなった十分な応答速度をもつように選んだ定数行列である。 q_s^* の各要素はそれぞれ作業仕様として独立した意味をもつことから、 A_1, B_1, C_1 はすべて対角行列とし、 q_s^* を非干渉化することにする。つぎに q_s^* と θ の間の関係を求める。 $J(\theta) \triangleq \partial q_s^* / \partial \theta$ とヤコビ行列を定義すると

$$\dot{q}_s^* = J(\theta) \dot{\theta} \quad (10)$$

$$\ddot{q}_s^* = J(\theta) \ddot{\theta} + \dot{J}(\theta) \dot{\theta} \quad (11)$$

$$\ddot{q}_s^* = J(\theta) \ddot{\theta} + 2\dot{J}(\theta) \dot{\theta} + \ddot{J}(\theta) \dot{\theta} \quad (12)$$

の関係が成り立つ。ここでならい速度は大きくなく、対象物の曲率半径は大きいと仮定すると、 $\dot{J} \approx 0, \ddot{J} \approx 0$ と近似でき(11), (12)式右辺の第2項、第3項は無視できる。このとき(10)~(12)式を考慮して(9)式は

$$A_1 J \ddot{\theta} + B_1 J \dot{\theta} + C_1 J \theta = \Delta q_s^* \quad (13)$$

と変形される。したがって特性補償器は(7)式を(13)式のような特性に補償しなければならない。このよう

な特性補償器は θ に応じて変化する(7)式の動特性を補償する部分と、 q_s^* と θ の幾何学的関係に基づく運動学的特性を補償する部分からなる。しかし一般に、両者は複雑に入り組んだ構造となり、必要となる計算量や記憶容量などの実現性の点で問題が多い。このような問題を克服するために、以下で示すように(13)式をある種の非干渉化された形に制限することによって、動特性補償と運動学的特性補償が分離された構造をもつ特性補償器の設計を行うことが有効である。

(13)式において $A_1 = a_1 D$, $B_1 = b_1 D$, $C_1 = c_1 D$, $D = \text{diag}(d_i)$ という非干渉化された形に制限しよう。このとき(13)式は次式のように変形される。

$$a_1 \ddot{\theta} + b_1 \dot{\theta} + c_1 \theta = J^{-1} D^{-1} \Delta q_s^* \quad (14)$$

つまり特性補償器は(7)式左辺を(14)式左辺のように補償する A_0, B_0, C_0 に関係した動特性補償と

$$v = J^{-1}(\theta_0) D^{-1} \Delta q_s^* \quad (15)$$

とする J に関係した運動学的特性補償とを分離して構成できることになる。この動特性補償はロボットの各関節を非干渉で一様な動特性をもつようにするという意味をもつ。

以上で述べた動特性補償の実現性については、(6)、(7)式が十分に同定されているときには計算量だけの問題となるが、一般には摩擦や駆動系のコンプライアンスの同定は容易ではない。そこで上述のような方針に基づく現実的な一つの特性補償器の設計法を4章2節で述べる。

3.2 手先姿勢制御の独立化

(15)式の計算に必要なヤコビ行列 J はロボットの機構だけから求まるものでなく、対象物の位置や形状にも関係する。このことをつぎに示そう。 Δq_s^* と $\Delta x_H, \Delta \alpha$ との関係は、これらが微小変位であるので、対象物は局所的に平面とみなしてよく、Fig. 4 より

$$\Delta q_H = \begin{pmatrix} (1 \ 0) Q P \Delta x_H \\ -\sec \beta \parallel \Delta x_R \parallel \Delta \alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\Delta l = (0 \ 1) Q P \Delta x_H + \sec \beta \parallel \Delta x_R \parallel \Delta \alpha \quad (17)$$

Fig. 4 Calculation of Jacobian

と求まる。したがって

$$\Delta q_s^* = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} QP & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_H \\ \Delta \alpha \end{pmatrix} \quad (18)$$

となり、(17)式に $\Delta x_H, \Delta \alpha$ と $\Delta \theta$ との関係を代入すると

$$J(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} QP & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x_H}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} \end{pmatrix} \quad (19)$$

を得る。(19)式で $P, \partial x_H / \partial \theta, \partial \alpha / \partial \theta$ はロボットの機構だけに關するが、 $Q, \beta, \Delta x_R$ は対象物にも関係する。

そこで作業仕様としては手先を対象物に対し一定姿勢に保つよう要求されることが多いことを利用して(19)式の計算を簡単にする。応答の速い手先部の関節を手先姿勢制御用とし、センサ軸が常に対象物に垂直になるように(注1)、他の関節とは独立した制御系を構成すると、 $\beta \cong \pi$, $Q = -I$ となり(18)式のうち独立に制御される $\Delta \alpha$ の部分を除いた式は、

$$\dot{q}_s^* \triangleq \left(\frac{\Delta q_H}{\Delta l} \right) = -P \Delta x_H \quad (20)$$

となる。したがって $\hat{\theta} \triangleq (\theta_1, \theta_2)^T$, $J_H(\theta) \triangleq \partial x_H / \partial \hat{\theta}$ と定義すると次式を得る。

$$\dot{J}(\theta) \triangleq \frac{\partial \dot{q}_s^*}{\partial \hat{\theta}} = -P J_H(\theta) \quad (21)$$

$\dot{J}$ は手先の位置に関するヤコビ行列を表わしている。

(21)式は作業時に θ_0 だけに基づいて計算できる。うえ、計算量も非常に少なくできる。また手先姿勢制御を独立に制御することは $\bar{Q} \cong -I$ の近似を成立たせ、Fig. 3 で p_s から q_s を作る座標変換を単純にする。

4. 実 験

4.1 実験装置

Fig. 5 に実験装置の概観を示す。左手に見えるのが実験に用いた3自由度関節形ロボットである。第1, 第2関節は電気-油圧サーボ弁で制御される油圧シリンダ(供給圧 6.86 MN/m²)、第3関節は D.C. サーボモータ(64 W)を用いている。各リンクはアルミニウム製で、長さは順に 1.00, 1.12, 0.145 (m) である。第1, 第2関節に角度検出用アブソリュート・

(注1) エンドエフェクタを対象物面に垂直でない角度に保つ場合には、センサ軸とエンドエフェクタの方向との間に適当な角度をつけておけばよい。

エンコーダ (12 bit), 第 3 関節にポテンショメータとタコジェネレータが取り付けられ, 油圧シリンダにはシリンダ内圧検出用の半導体圧力変換器がそれぞれに 1 対取り付けられている。また第 3 リンクの先端には操作変数検出用センサが取り付けられている。

Fig. 6 に試作した操作変数検出用センサの細部を示す。センサは平行な 1 対の直動形ポテンショメータ (計測範囲 ± 5 mm) とインクリメンタル・エンコーダ (300 puls/round) からなる。Fig. 6 はセンサが対象物を検出しているところである。P1, P2 はポテンショメータ, E はエンコーダを示している。二つのポテンショメータ信号の平均値からならい間隔の偏差, 差からならい角度の偏差を計算することができる。ならい速度は, エンコーダ軸に取付けられたゴムローラをスプリングで対象物に押し付けて, これから得たパルス列を F/V 変換して検出する。

Fig. 5 で右手に見えるのがハイブリッド・コントローラである。これは乗算形 D/A 変換器を用いて, アナログ信号に乗ずる係数を計算機 (NOVA 01 24 KW) が任意に指定できるようにしたものである。乗算形 D/A 変換器は 12 チャンネル用意した。

4.2 制御装置の設計

ここでは実験に用いた制御装置の設計法を説明す

Fig. 5 Comprehensive view of the whole system

Fig. 6 Sensor detecting the manipulation variable

る。

運動学的特性補償は, ならい間隔とならい速度の重みは等しいとして $\hat{D} \triangleq \text{diag}(d_1, d_2) = I$ と選んだため, $\tau = \hat{J}^{-1}(\theta_0) \Delta \hat{q}_s^*$ として行った。

動特性補償については, 本実験で用いたロボットでは各種パラメータの同定は容易でないので, 実験に基づいて行う以下のような方法を用いた。

重力に対し静的平衡を保つのに必要なサーボ弁電圧を実験により求め, $\hat{\theta}$ の関数として記憶として記憶した。作業時には $\hat{\theta}$ に応じて関数計算を行い, サーボ弁入力電圧のバイアス成分とした。

非干渉化補償については, 10 rad/s 以下の周波数では動的干渉がほとんど現れないことを確認したので省略した。

油圧駆動関節形ロボットの動特性は 3 次系と見なされ, 特性補償には圧力の低周波成分を遮断した D. P. F. (Dynamic Pressure Feedback) 補償が効果的であることが報告されている¹⁴⁾。ここでは D. P. F. 信号の比例ゲイン $K_P \triangleq \text{diag}(K_{P1}, K_{P2})$ とバイアス電圧を除いたサーボ弁入力電圧の比例ゲイン $K_S \triangleq \text{diag}(K_{S1}, K_{S2})$ を調節して一様化を行った。具体的には, 応答速度の遅いほうの関節である第 1 関節のステップ応答をとり, 安定性, 速応性の観点から, 基準応答として望ましいものを一つ選ぶと計算機が各 $\hat{\theta}$ においてステップ応答の実験と, 基準応答との誤差積分値の極値探索操作を繰返し, 基準応答に近いステップ応答を与える K_P, K_S を選り出すプログラムを開発して行った。

4.3 実験結果と考察

設計, 試作した自律的ならい制御系を用い, 水平面と S 字曲面の 2 種類の形状の対象物表面をならう実験を行った。

Fig. 7 Motion of the robot arm for a horizontal object

Fig. 8 Motion of the robot arm for an S-shaped object

Fig. 7 と Fig. 8 は作業時のロボットアームの動きを示している。Fig. 7 中のグラフは2の腕姿勢で調整した K_P, K_S を用いて1, 2, 3の腕姿勢でのステップ応答を調べたものである。これから水平対象物のならいでは K_P, K_S 一定として差し支えないことがわかる。Fig. 8 中のグラフは4の腕姿勢において調節した K_P, K_S を用いた時の1, 2, ..., 7の各腕姿勢におけるステップ応答である。S字曲面对象物に対しても K_P, K_S の値は一定と考えてよい。

(1) 水平対象物

水平対象物に対するならいの実験結果を Fig. 9 に示す。ならい速度の仕様を 20, 40, 60, 80, 100 mm/s,

Fig. 9 Experimental result for a horizontal object

ならい間隔の仕様を 5 mm とした。

Fig. 9 において 20~60 mm/s では間隔の偏差は 0.5 mm 以内に収まっているが, 80, 100 mm/s では 1.0 mm を越えている。また速度が大きいほど, 手先が上へ浮き上がる傾向がある。これは第1関節の運動によって第2関節に加わる遠心力などの動的的非線形性の影響と考えられる。なお速度の偏差はいずれも 5~10% 以内である。

この実験により, 低速ならい作業では4章2節で設計した主に静特性の補償を考えた補償器でもある程度満足できる性能を示すことがわかった。しかし速

度が上がるにつれて, 偏差は確実に大きくなっており, 高速ならいや曲率半径の小さいならい作業ではより厳密な動特性の補償が必要となると考えられる。

(2) S字曲面对象物

S字曲面对象物に対するならいの実験結果を Fig. 10 に示す。ならい速度とならい間隔の仕様はそれぞれ 20 mm/s と 5 mm とした。

A, B, Cの3点でのジャンプ現象を除いて, ならい間隔とならい速度の偏差はそれぞれ 1.3 mm 以内と 10% 以内に収まっている。Fig. 10 ではこのときの第2関節の動きも合せて記録した。これを見ると3点でのジャンプは全て第2関節の運動の方向が変化するときを生じており, 油圧シリンダ部における静摩擦が作用して手先の動きにスティック・スリップ状の急な変化を生じさせ, これが応答の速い第3関節の運動に影響を与えることが原因であると考えられる。このような油圧シリンダで駆動されるロボットで, さらに滑らかで高精度なならいを実現するためには摩擦の発生に対する考慮が重要である。なお, ならい速度 40 mm/s でもほぼ同様な結果を得ている。

この実験ではS字曲面对象物の位置や形状に関する情報はロボットの手先のセンサ信号だけから得ており, 完全な自律的なならい作業である。S字曲面对象物をロボットから約 10 cm 遠ざけて設置した場合でも, パラメータの変更や教示を行うことなく, 同程度の性能で自律的なならい作業を行うことを確認した。

Fig. 10 Experimental result for an S-shaped object

なお従来のプレイバック制御方式と比較すると、計算遅れおよびセンサの感度などの点から、軌道偏差がやや大きく、また径路の急変を予知した制御を行うことができないなどの問題は残されている。この対策としては、前もっておおよその径路がわかっている場合には、両制御方式の折衷方式を採用することが考えられる。

5. 結 言

本論文で得た結論は以下の4点に要約される。

1) 対象物に関する情報をロボットの手先のセンサ信号だけから得て制御される自律的な制御系の特徴はつぎのとおりである。

i) ロボットの手先の運動に関する直接の目標値である参照点は対象物を含むロボットシステムが自ら作り出しており、従来の目標軌道を外部から時間の関数として与える軌道制御系とは本質的に異なる。

ii) 外部から与えられる目標軌道に替えて、より高級な目標値である作業仕様が直接比較の対象として取り入れられている。

2) 動特性と運動学的特性を分離して補償することは自律的な制御装置の構造を単純にし、実現性の観点からも望ましい。これにはロボットの各関節が線形、非干渉で一樣な特性になるように動特性補償を行えばよい。

3) 手先部の関節を手先姿勢制御専用としてはほかの関節と独立に制御し、センサ軸を対象物面に垂直に保つように制御することによってヤコビ行列の計算を単純化できる。

4) 提案した自律的な制御装置の設計法を電圧—油圧駆動の関節形ロボットに適用し、実験によ

てその有効性を確認した。

今後の課題としては、3次元自律な制御の問題が残されている。原理的には本論文の考え方をそのまま適用すればよいが、3次元な用センサの開発や補償器の設計アルゴリズムが非常に複雑になることが予想されるので、その単純化の問題の解決が必要となる。

最後に、実験に際して熱心な協力を惜しまれなかった、京都大学大学院生 武田宗久君(現在、三菱電機勤務)に対して感謝の意を表します。なお、この研究は昭和 56 年度科学研究費補助金(一般研究(B)56460092)の援助を受けた研究の一部である。

参 考 文 献

- 1) R.G. Abraham and L.Y. Shum: Robot-Arc Welder with Contouring Teach Model, Proc. 5th ISIR, 239/258 (1975)
- 2) S. Ando, F. Kozawa, K. Enomoto, A. Tsuchihashi and T. Kogawa: Computer Controlled Industrial Robot for Painting, Proc. 8th ISIR, 689/700 (1978)
- 3) E. Tsuda, H. Koyama and F. Noguchi: Development of Plasma Cutting Robot for the Automobile Industry, Proc. 11th ISIR, 723/730 (1981)
- 4) N. Miyake, S. Ando, S. Saikawa, A. Ohnishi and R. Tokuno: Multi-Pass Welding of Nozzles by an Industrial Robot, Proc. 10th ISIR, 51/59 (1980)
- 5) 浅田, 花房: 工業用ロボットの空間曲線な制御, 計測自動制御学会論文集, 16-5, 740/746 (1980)
- 6) S. Futami, N. Kyura and I. Matsumoto: A Control Algorithm for Tracing and Visual Servoing by Industrial Robots, Proc. 11th ISIR, 259/266 (1981)
- 7) V. Nicoló, V. Moreggia, P.G. Varrone and G. Venturello: Industrial Robots with Sensory Feedback Application to Continuous Arc Welding, Proc. 10th ISIR, 15/22 (1980)
- 8) 河原, 滝: 開先形状検出による溶接線な制御, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 492/498 (1979)
- 9) I. Masaki, R.R. Gorman, B.H. Shulman, M.J. Dunne and H. Toda: Arc Welding Robot with Vision, Proc. 11th ISIR, 821/824 (1981)
- 10) S. Ando and N. Miyake: Development of New Robot Profile Following Method, Proc. 11th ISIR, 447/454 (1981)
- 11) 花房, 清水: 二次元な機構の動作に関する一考察, 制御工学, 9-9, 459/467 (1965)
- 12) 花房, 吉川, 中村, 武田: 油圧駆動関節形ロボットの自律的な制御, 第25回システムと制御研究発表講演会論文集, 97/98 (1981)
- 13) H. Hanafusa, T. Yoshikawa and Y. Nakamura: Analysis and Control of Articulated Robot Arms with Redundancy, Preprints IFAC 8th Triennial World Congress, XIV-78/XIV-83 (1981)
- 14) H. Hanafusa, H. Asada and T. Mikoshi: Design of Electrohydraulic Servo Systems for Articulated Robot Arm Control, Proc. IFAC Symposium on Pneumatic and Hydraulic Components and Instruments in Automatic Control, 223/228 (1980)