実験モーダルアナリシスを用いた産業用ロボットの 振動解析と位置決め制御*

森 本 喜 隆^{*1}, 稲村 豊四郎^{*2}, 安 井 武 司^{*3}

Analysis and Control of a Flexible Robot Arm by using Experimental Modal Analysis

Yoshitaka MORIMOTO, Toyoshiro INAMURA and Takeshi YASUI

A new control method for positioning the end effector of a flexible robot arm has been developed using experimental modal analysis. Based on the fact that robotic motion can be described by transfer functions between the input and the output at the representative positions of the piecewise linearized section, prediction of motion and control of motion have been achieved with good results. In this study, the following three themes are discussed: 1) a new method which advances previous methods, 2) prediction of motion by a new method and its comparison with experiments, 3) experimental results of motion-control designed smooth motion.

Key Words: Flexible Robot, Experimental Modal Analysis, Dynamic Control, Experimental Transfer Functions, Fourier Transform

1. はじめに

従来のロボットの位置決め制御は、ロボットアーム等が剛体であると仮定して行っているため、ロボットのロボットアーム等が急激な加速減速の際に発生する柔軟性に起因した振動に対しては有効な制御方法とは言えない。この振動を抑制するため、加速減速を小さく、移動速度を遅く、あるいはロボットの剛性を高くして振動が発生しないようにしているが、前者はロボットの作業効率を低下させ、後者はエネルギー効率を悪くする。このフレキシブルロボットアームに関しての運動解析⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾や振動制御⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾が行われているが、これらの研究の最重要課題は、フレキシブルなロボットアームを十分正確に制御するために複雑な動力学を如何に記述するかであった。しかし、これらはロボット一台ごとに変化する特性や解析的に記述不可能な特性を十分に考慮しているとはいえない。また、実用的な見地からロボットの動力学をより簡潔に記述することが望まれていることも事実である。

以上の問題から、前報⁽¹¹⁾ではロボットの運動を、ロボットの入出力特性のみに着目し、制御指令とエンドエフェクタ間の実測した伝達関数に基づき区分線形化して表す方法を提案した。前報⁽¹¹⁾で提案した方法は、エンドエフェクタの挙動を予測あるいは制御する場合、ある程度簡単で能率的であるが、パラメータの同定に時間を要したり、前の区間の履歴を正確に受け継がないという問題点があった。

この問題点を克服する新しい方法は、前報⁽¹²⁾で提案した。この方法は、入出力関係の定式化を改善し、前の区間の履歴を正確に受け継ぐものとなった。この提案した制御手法によって得られた実験結果は、産業用ロボットのエンドエフェクタのたわみによる振動を著しく抑制した。しかし、区間分割の指針が明確でなく、試行錯誤的に区間分割数を決める必要があった。

本研究は、エンドエフェクタの振動が許容誤差内に収束する条件から区分線形化に要する区間数を求める方法と産業用ロボットを用いた位置決め制御結果について報告する。

2. ロボットの運動解析

2.1 周波数領域法(区分接続法) ロボットの入

* 原稿受付 平成4年3月23日.

^{*1} 正員, 石川県工業試験場機械電子部 (〒920-02 金沢市戸木町口-1).

^{*2} 正員, 名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町).

^{*3} 正員, 金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野 2-40-20).

出力関係を前報⁽¹²⁾で求めた周波数領域法を用いて記述する。この手法は、図1に示すようにロボットの動作範囲において、動特性が変化しないと見なせる区間に分割して、それぞれの区間においては式(1)の入出力関係が成り立つとする。

$$x_{(k)}(t) = \int_0^t h_{(k)}(t-\tau) v_p(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、 $x_{(k)}(t)$: 第k区間の応答

$h_{(k)}(t)$: 第k区間のインパルス応答

$v_p(\tau)$: ロボットの速度の目標値

この場合、時間 ' t ' とエンドエフェクタの速度 $x_{(k)}(t)$ は全ての区間にわたっている。式(1)は、 $t < 0$ で $h_{(k)}(t)$ と $v_p(t)$ が共に零であることから、さらに次のように書き改められる。

$$x_{(k)}(t) = F^{-1}[H_{(k)}(j\omega) V_p(j\omega)] \quad (2)$$

ここで、 $V_p(j\omega)$ は $v_p(t)$ のフーリエ変換であり、 $F^{-1}[\]$ は $[\]$ 内の逆フーリエ変換である。また、 $H_{(k)}(j\omega)$ は速度指令(入力)とエンドエフェクタの速度(出力)との間のk番目の区間で測定した伝達関数である。式(2)は $k = 1, 2, \dots$ において順次計算することができ、第K区間では、そこに相当する伝達関数 $H_{(k)}(j\omega)$ を用いるから、各々の区間に対応する部分のみが重要となる。

今、図2に示すように式(1)において $k = 1$ とし、その時の応答を計算する。この時、用いる伝達関数は、第一区間に相当する部分でのみ有効であるので、計算結果はその部分だけ正確であることに注意を要する。ここで、この部分の応答は、第二区間で第二区間の伝

図1 産業用ロボットの区間分割

達関数を用いて計算する応答の履歴であるはずである。そこで、第二区間の伝達関数を用いて、第一区間で得られた出力に対する仮想入力を求めることにより、再び式(1)により第二区間まで正確な応答が得られる。これによれば、第一区間に相当する部分は先に得られた結果と同じ応答が得られ、それと同時に第二区間に相当する応答は当然正確であるため、次の第三区間での入力も同様に正しいものが得られる。

これを実現するため、式(2)を修正し次式を得る。

$$v_{p(k)}(t) = F^{-1}[X(j\omega) / H_{(k)}(j\omega)] \quad (3)$$

式(3)において伝達関数 $H_{(k)}(j\omega)$ と $X(j\omega)$ に第二区間の伝達関数と既に第一区間で得られた応答を各々代入することで仮想の入力 $v_{p'(2)}(t)$ を計算する。ここで、第二区間の伝達関数 $H_{(2)}(j\omega)$ と $v_{p'(2)}(t)$ を用いて得られた応答は第一区間の応答 $x_{(1)}(t)$ と同一となる。また、第二区間の応答は第一区間の入力を受け継いでいるので、仮想入力 $v_{p'(2)}(t)$ の第二区間に相当する部分を所期の入力 $v_p(t)$ の部分と入れ換えることにより入力 $v_{p''(2)}(t)$ を変更する。得られた入力 $v_{p''(2)}(t)$ は第二区間の伝達関数 $H_{(2)}(j\omega)$ によって応答 $x_{(2)}(t)$ を与える。この結果、第二区間に相当する部分が正しい応答履歴を伴って得られ、第一区間に相当する部分は、 $x_{(1)}(t)$ に等しい。しかし、伝達関数 $H_{(2)}(j\omega)$ は第二区間におい

図2 周波数領域法

でのみ有効であるので、第三区間以降に相当する部分については正確な応答ではない。第一区間から第二区間までの応答履歴を伴う第三区間、第一区間から第三区間までの応答履歴を伴う第四区間、... に対して、前述の方法を順次適応させることによりエンドエフェクタの応答を得ることができる。

ここで、応答を計算する際に必要とされるデータ数は、各区間の指令の重ね合わせに等しく、常に第一区間から始まる応答履歴を用いる。この場合、区間数が増加すると得られる結果が正確になることは、容易に理解されるであろう。また、この方法は、系の特性を同定するなどの特別な技法を要しない。

これまでの記述は、1 軸運動の場合に限って行ってきたが、多軸運動の場合でも動作軌跡を個々の軸に分解することにより取り扱うことができる。ただし、この分解は、コリオリの力や遠心力の様な非線形項が無視できる場合においてのみ成り立つ。

2.2 区間分割数と予測精度 前述の手法において問題となるのは区間分割数と予測精度の関係である。そこで、実際に予測・制御を行う場合、具体的にどれだけの区間で分割すればよい結果を得られるかの指針を得るために、各手法ごとに区間数と予測精度との関係を図3 に示すような1 自由度モデルを用いて比較検討した。

いま、1 自由度モデルの運動方程式が次式

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = c\dot{z}(t) + kz(t) \quad (4)$$

で与えられるとすると加速度と速度は線形加速度法を用いると、

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t+\Delta t) = & [c\dot{z}(t+\Delta t) + kz(t+\Delta t) - c\dot{x}(t) \\ & + \Delta t \ddot{x}(t)/2] - k\{x(t) + \Delta t \dot{x}(t) \\ & + (\Delta t)^2 \ddot{x}(t)/3\} / \{m + \Delta t c/2 \\ & + (\Delta t)^2 k/6\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{x}(t+\Delta t) = \dot{x}(t) + \Delta t \{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t+\Delta t)\}/2 \quad (6)$$

で表される。

そこで、図4 に示す強制変位入力(動作時間;3秒,加速・減速時間;0.1秒,速度一定時間;2.8秒, $\Delta t=0.01$ 秒)を与えた時のエンドエフェクタの応答を、 $\omega = \sqrt{k/m}$, $f = \omega/2\pi$, $\zeta = c/\sqrt{2mk}$ の関係より、表1 に示すA~F のモダラパラメータを用いて式(5),(6)から求めた。ここで、動作開始と動作終了の区間の時間は、他の区間の時間の1/2に設定し、各パラメータは線形に変化すると仮定した。A タイプのパラメータを用いて得られた応答予測

図3 計算に用いた1自由度モデル

図4 計算に用いた強制変位入力

表1 計算に用いたパラメータ

Type	Start frequency Hz	Stop frequency Hz	Start damping ratio	Stop damping ratio
A	3.0	6.0	0.08	0.08
B	5.0	8.0	0.08	0.08
C	7.0	10.0	0.08	0.08
D	3.0	6.0	0.05	0.05
E	5.0	8.0	0.05	0.05
F	7.0	10.0	0.05	0.05

結果と分割区間数毎に各手法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾から求めた応答予測結果との誤差自乗和の関係を図5 に示す。図より、明かに区分接続法の方が他の手法より早く厳密解に収束しているのが分かる。しかし、この手法では、具体的な区間分割の指針が明確ではない。そこで、以下に示す評価関数を用いて区分接続法で予測制御する際の動作時間と区間数を決定する手法を述べる。

今、第n 区間における誤差自乗和平均を

$$\sigma_n^2 = 1/t_n \int_0^{t_n} (x_0(\tau) - x_k(\tau))^2 d\tau \quad (7)$$

図5 区間分割と誤差自乗和との関係

図6 無次元誤差自乗和の比較

また、第 n 区間における振動自乗和平均を

$$\delta_n^2 = 1/t_n \int_0^{t_n} (x_0(\tau) - z(\tau))^2 d\tau \quad \dots\dots(8)$$

とおく。ただし、

$z(t)$; 設計入力, $x_0(t)$; 実応答(厳密解)

$x_k(t)$; 第 k 区間の伝達関数から求めた予測応答

t_n ; 第 n 区間の時間

これにより、第一区間における無次元誤差自乗和と最終区間の無次元誤差自乗和の関係を図6に示す。図より、各データは直線上にあることが分かる。これは、例えば最終区間の誤差をある値に抑えたい時の第一区間の誤差許容値が明確になることを意味する。

次に、第一区間の持続時間と第一区間における無次

図7 第一区間における無次元誤差自乗和と持続時間の関係

元誤差自乗和の関係を図7に示す。これより、図6と併せて、全体の誤差許容値を設定すると第一区間の誤差許容値が一意に定まり、かつこの時の第一区間の持続時間を求めることができる。これは、第一区間の伝達関数から応答を計算して実応答と比較し、図6、図7を求め、さらに得られた第一区間の時間から分割区間数を決定できることを意味する。

2.3 実験 実験に用いた産業用ロボット(コマツRTL-20)は、図1に示すように6つの旋回軸を持ち、それぞれDCサーボモータで駆動され、1100mmのアーム長を持ち、200Nの可搬能力がある。実験は、このロボットのL軸(他の軸は動作しない)を用いることによって、与えられた命令に対してエンドエフェクタ先端の挙動(速度)の実測値と計算値を比較した。まず、ロボットが台形の速度パターンに従い動作するように指示することによって、目標地点へ移動するまでの速度を測定した。また、伝達関数の測定に用いた条件は、加速・減速の時間; 0.01秒とし、到達最高速度186mm/s; 0.02秒の持続時間に設定した。このインパルス指令は、ロボットコントローラに目標値を与えることによって生じる。この時の動作開始は、ロボットコントローラにコンピュータのD/Aからトリガー信号を与えて行った。また、入力信号は、トリガー信号が発生する時間を開始時間として、前述の台形の速度パターンをコンピュータ内で作成し、これを挙動予測計算に用いた。

一方、動作速度は、エンドエフェクタ先端のフランジに取り付けられた加速度センサー(歪ゲージ型)によって一旦加速度として測定される。この測定された加速度データは、A/Dコンバータを介し、数値積分を行い速度データに変換し保存される。コンピュータ

のメモリに保存されたこれらの入出力データをフーリエ変換し伝達関数を求める。これらの測定は、第一区間から最終区間まで繰り返される。図8に実験で得られた伝達関数を示す。

挙動予測は、伝達関数測定時とは異なる速度パターンからなる動作命令に対するエンドエフェクタ先端の速度応答を計算し、実測値と比較した。この時、目標値は図6より $(\sigma_n^2/\delta_n^2)/(\sigma_1^2/\delta_1^2) \approx 1$ であるから、実験によりあらかじめ図7に相当する $\sigma_1^2/\delta_1^2=0.1$ となる第一区間の時間 $t_1=0.10$ 秒を求めた(加速、減速時間0.06秒、到達最高速度312.2mm/s、速度一定持続時間0.74秒)。図9に測定結果と計算結果を示す。ここでは、対応するロボットの動作を5つの区間に分割して行った。実験の際のエンドエフェクタの回転角は約 9° である。この図から、予測結果が測定結果とほとんど一致していることが確認された。

3. ロボットの位置決め制御

3.1 理論 ロボットを制御する方法は、第二章

図8 区間毎の伝達関数

図9 挙動予測結果

の挙動予測の逆問題として考えられる。挙動予測の場合と逆に入出力を交換すれば、図10に示されるようにエンドエフェクタの先端が設計されたスムーズな動作を実現する制御命令を得るための方法が直ちに導かれる。まず、式(3)を用い、 $v_{p(1)}(t)$ を計算するために、設計したエンドエフェクタ先端の速度のフーリエ変換を行う。次に、式(2)により入力 $v_{p(1)}(j\omega)$ と伝達関数 $H_{(2)}(j\omega)$ をそれぞれ代入し、仮想出力 $x_{(2)}(t)$ を求める。さらに、この第一区間に相当する部分をもとの設計した出力の相当する部分に変更することによって出力 $x_{(2)}(t)$ を修正する。次に修正された出力 $x'_{(2)}(j\omega)$ と $H_{(2)}(j\omega)$ を用い、式(7)を計算する。そして、第二区間まで正しい入力 $v_{p(2)}(t)$ を得る。挙動予測と同様に最終区間の結果が得られるまで、この操作を続ける。ここで、 $X(j\omega)/H_{(k)}(j\omega)$ の高い周波数範囲は、制御の不安定要因になる可能性があるため、25Hz以下のローパスフィルタを挿入した。

3.2 実験 実験に用いた産業用ロボットは、台形、2次曲線などのような限られた形の指令だけしか作ることができない。さらに、このロボットは、入力信号とフィードバック信号の偏差がある値を越えたときに働く非常停止システムを持つので、ロボットのコントローラに本研究で計算された目標値を与えることができない。このため、本研究では図11に示されたような特別な方法を用いた。まず、計算された入力に近

図10 周波数領域法を用いた入力算出方法

図11 補正入力教示方法

図12 制御結果の比較

い台形の速度命令をコントローラから発生させる。これと同時に付加入力 $n(t)$ された入力を、コントローラから与えられた場合と等しい命令を実現するように、サーボアンプの手前に与えた。(11)(12)

実験は、加速・減速時間0.06秒、到達最高速度312.2 mm/s、持続時間0.74秒の台形の速度パターンにエンドエフェクタの先端が動作するように設計し行った。ロボットの動作区間分割は5区間とし、また用いた伝達関数は、第2章で用いたものと同じである。実測値は、エンドエフェクタの先端の速度を歪ゲージ型加速度センサーで測定した。図12は、(a)通常の制御の $v_p(t)$ だけ、(b) $v_p(t)$ と $n(t)$ によって制御されたエンドエフェクタの先端の速度測定結果の比較を示している。図より、提案する方法によって、90%以上振動が抑制されていることが分かる。

4. 結 論

(1) 実験モード解析によって得られたデータを用いてロボットの入出力を表現する新しい手法⁽¹²⁾について、区間分割を行うための方法を提案した。また、この方法の有効性を産業用ロボットを用いて挙動予測を行い確認した。

(2)(1) で得られた区間分割による挙動予測結果を基に、ロボットの滑らかな高速動作を実現するための制御を行い、著しい振動抑制効果を確認した。本手法は、産業用ロボット等の位置決めにおいて、比較的短い動作範囲でかつ系の動特性が線形に近い場合に特に有効である。

(3) 実験は、ロボットの一軸動作で系の動特性が線形に近い場合に限定して行ったので、さらに多軸コントロールや系の動特性が大幅に変化する場合などを含めた研究が、提案された方法の実用的価値を確かめるために必要とされる。

文 献

- (1) Sunada, W.H., Dubowsky, S., On the Dynamic Analysis and Behaviour of Industrial Robotic Manipulators with Elastic Members, *ASME, J. Trans. Auto. Design*, 105 (1983), 42.
- (2) Book, W.J., Recursive Lagrangian Dynamics of Flexible Manipulator Arms via Transmission Matrices, Carnegie-Mellon University, The Robotic Institute, Technical Report CMU-RI-TR-83-23.
- (3) Usoro, P. B., Nadira, R., and Mahil, S. S., A Finite Element/Lagrange Approach to Modeling Lightweight Flexible Manipulators, *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 108, (1986), 198.
- (4) Streit, D. A., Krousgrill, C. M., and Bajaj, A. K., A Preliminary Investigation of the Dynamic Stability of Flexible Manipulators, *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 108, (1986), 206.
- (5) Book, W. J., Maizza-Neto, O., and Whitney, D. D., Feedback Control of Two Beam, Two-Joint System with Distributed Flexibility, *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 97, (1975), 424.
- (6) Singh, S. N., and Schy, A.A., Control of Elastic Robotic Systems by Nonlinear Inversion and Modal Damping, *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 108, (1986), 180.
- (7) Futagami, S., Kyura, N., and Hara, S., Vibration Absorption Control of Industrial Robots by Acceleration Feedback, *IEEE, Transactions of Industrial Electronics*, IE 3, (1983), 299.
- (8) Fukuda, T., Flexibility Control of Elastic Robotic Arms, *Journal of Robotic Systems*, 2-1, (1985), 73.
- (9) 井上, 越智, 齊藤: 繰り返し制御による過渡応答の改善, 計測自動制御学会論文集, 22-1, (1986), 30.
- (10) 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, (1991), 1396.
- (11) Y. Morimoto, T. Inamura and K. Mizoguchi: Dynamic Control of a Flexible Robot Arm by Using Experimental Modal Analysis, *Proc. of the ASME Winter Annual Meeting, Modeling and Control of Robotic Manipulators and Manufacturing Processes, DSC-6*, (1987) 337.
- (12) Y. Morimoto, T. Inamura and R. Makita: Analysis and Control of a Flexible Robot Arm by Using Experimental Modal Analysis, *JSME Inter National Trans.* SIII, 33, (1990) 634.