ソフトウェアサーボによるロボットアームの防振制御*
(第2報)佐久田 博司^{*1}, 吉 谷 豊^{*1}, 米 沢 隆 弘^{*2}Vibration Absorption Control of Robot Arm
by Software Servomechanism
(2nd Report)

Hiroshi SAKUTA, Yutaka YOSHITANI, and Takahiro YONEZAWA

The prevention of robot arm vibration caused by resonance vibration which arises from the torque variation of a Harmonic drive reduction gear has become a problem for fast robot drive. The paper presented a model of robot arm vibration, and demonstrated an effective full speed range vibration absorption control method by applying the theory of the dynamic damper. Vibration energy was absorbed by the feed forward control of power input. A flexible vibration absorption control system was established by the use of a software servomechanism.

Key Words: Vibration, Application of Control, Vibration Absorption, Robot Arm, Software Servomechanism

1. 緒 言

近年の、ロボット工学の急速な技術的進歩と需要の拡大により、産業用ロボットの動作もより高度なものが要求されるようになってきた。特にアーム先端の軌跡精度の向上や、高速位置決め制御に対し、ハーモニックドライブ減速機⁽¹⁾(以下、H. D.と略す)のトルクむらに起因した共振振動、およびロボット運動の高速化に伴う過渡振動は大きな障害となり、その防止の方策が求められている。

本研究では、ロボットの防振制御の第2報として、これらの垂直形アームにおける共振振動、および過渡振動を防振制御対象とした。

本制御法は、ロボットの振動解析のための各々適切な系のモデル化を行い、機械的な防振法である動吸振器の理論を応用することにより、フィードフォワード的に、系のもつ振動のエネルギーを吸収し防振を行うものである。また、コスト的に有利であり、かつ高機能化の実現できるソフトウェアサーボを用いることで、多くの産業用ロボットに適用が可能である。

2. ロボットアームの防振制御

ロボットアームおよびその駆動系を制御対象として見た場合、本来ロボットシステムの制御出力はアーム先端の位置であるから、これを直接検出し、クローズドループなどを構成すべきである。しかしながら、振動問題に関してはその効果が与える利益に比して検出器や回路の増加によりコストの面で不利となる場合が多い。

動吸振器は、ある限られた周波数範囲にしろ十分な効果を挙げることは確かめられているから、これを応用して、すべての速度制御範囲において最適となるように、周期と振幅を動的に調整することができれば、効果的な防振法になると考えられる。

3. トルクむらに起因した共振振動

第1報⁽²⁾において、水平形アームの共振振動に対しハード的回路による十分な防振効果が得られているから、ここでは、重力項の作用する垂直形アームに対する本制御法の効果について報告する。

3・1 振動モデルと運動方程式 ここで、共振振動に対する振動モデルを作成しその運動方程式を解くことにより、本制御法の実際的な制御アルゴリズムを

* 昭和62年10月2日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月8日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町)。

^{*2} 正員、松下電器産業(株) (〒571 門真市大字門真1006)。

求める。H. D.を一般的な歯車系に置き換え、アーム駆動系の振動モデルを図1に示す三自由度の一軸系モデルとして考える。

今、モータ回転速度を ω [rad/s] とし、座標自体が角速度 ω [rad/s] で回転すると考える。図1に示す振動モデルの運動方程式は、式(1)のようになる。

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 - \theta_2) &= T_w \sin(\omega/n)t \\ J_2 \ddot{\theta}_2 - k_1(\theta_1 - \theta_2) + k_2(\theta_2 - \theta_3) &= F_0 \sin 2\omega t \\ J_3 \ddot{\theta}_3 - k_2(\theta_2 - \theta_3) &= F(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

トルクむらおよび重力項を考慮すれば、式(1)の解は、式(2)となる。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= A_1 \sin 2\omega t + B_1 \sin(\omega/n)t \\ \theta_2 &= A_2 \sin 2\omega t + B_2 \sin(\omega/n)t \\ \theta_3 &= A_3 \sin 2\omega t + B_3 \sin(\omega/n)t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)、(2)より、アームの振動を打ち消すためにモータに加えるべき角偏位 θ_3 は、

$$\theta_3 = -(F_0/k_2) \sin 2\omega t - \alpha_w \cdot \sin(\omega/n)t \quad \dots\dots\dots (3)$$

H. D.の減速比が大きいため、 $\alpha_w \ll F_0/k_2$ となり、したがって、式(3)は、式(4)のように近似でき、結果的に重力項の影響は無視される。

$$\theta_3 \approx -(F_0/k_2) \sin 2\omega t \quad \dots\dots\dots (4)$$

3.2 防振制御アルゴリズム ここで、ソフトウェアサーボによる防振制御アルゴリズムを示す。

$$\theta = \theta - \frac{(F_0/k_2) \cdot \sin(2\omega t + \phi)}{\text{Gain} \cdot \sin\text{-Table}}$$

(1) Gain はデジタルスイッチによりマニュアルで調整する。

(2) Sin-Table は、ROM 内部に書き込まれた1回転パルス数当たり2周期分の sin データ (エンコーダ値をアドレスとする) を使用する。

図1 共振振動 振動モデル

(3) 位相 ϕ は、CPU 内部においてエンコーダの ϕZ 相に対する振動の位相のずれ量を偏差カウンタ値により検出し、そのずれ量をエンコーダカウント値に加算することにより自動位相調整を行う。

3.3 実験システムの構成 ここで、本制御法の効果を確認するために構成した実験システムを図2および図3に示す。

本実験システムにおいて、ソフトウェアサーボには、PLL 形 DC サーボモータドライバを使用し、ROM 内部に防振アルゴリズム (8051 CROSS-ASSEMBLER) を組み込み防振制御を実現した。アーム機構部は、重力項を考慮した垂直形アームと水平形アームの両用形 (アーム慣性モーメント 0.058 kg·f/ms²), H. D. (減速比 1/128), DC サーボモータ (出力 90 W), ロータリエンコーダ (分解能 1024 pulse/rev.) を使用した。

また、振動レベルの計測ならびに解析には、加速度ピックアップと FFT アナライザを使用した。

3.4 防振の効果 本制御法の効果を図4、5に示す。図より防振振動レベルは、全速度範囲において 0.1 G 以下に抑えられており、防振の効果を十分に果たしていることが確認できる。図5に示す垂直形モデルア

図2 実験システムの構成

図3 モデルアーム

ームの共振曲線に二つのピークが生じているのは、重力項の影響である。

今回は、モータ回転数 N に対する $2N$ の周波数成分における共振振動についてのみ防振制御を行ったが、 $N, 4N, 6N$ などについても ROM 内部に、それぞれの Table を設けることによりすべての周波数成分における防振が可能となる。

H. D. の偏心量に対する影響、アームの慣性モーメントの変化に対する影響についても、第1報同様の良い防振の効果が得られた。

4. 高速化に伴う過渡振動

最近、さらにロボットの稼働率を上げたい、つまりロボット運動を高速化したいという要求が強くなってきているが、もともと高速化と精密化というものは相反するものであり、このロボットの高速化によりアームの過渡振動が問題となる。そこで、その防振の対策が求められてきた。

4.1 振動モデルと運動方程式 共振振動においては、振動モデルを三自由度系モデルとして扱ったが、過渡振動に対するモデルとしては、図6に示すような一自由度系の振動モデルとして扱う。

ロボット運動の高速化の極限は、モータのもつ最大の能力を生かした最大加速・最大減速を行うことにな

り、駆動距離が短ければ、図6に示すような三角駆動の形となる。この加速度が変化するところで、過渡振動が発生する。ここで、固定端が、 y だけ動いたときのアームとの相対変位、すなわち、ばねのたわみを θ_r とすると、運動方程式は式(5)のようになる。

$$I\ddot{\theta}_r + c\dot{\theta}_r + k\theta_r = -I\ddot{y} \quad \dots\dots\dots (5)$$

4.2 防振制御アルゴリズム 図7に本防振制御の基本となるアルゴリズムを示す。一般的に動吸振器は、定常的振動が外力として作用するときその振動振幅を小さくすることを目的としているが、ここでは、過渡振動を速く減衰させることを目的としている。

図7に示すように、①の状態を初期状態としたとき、何もしなければエネルギー保存則より、①のばねのもつエネルギー $E_k \rightarrow$ ②のマスのもつ運動エネルギー $E_v \rightarrow$ ③の E_k となり振動する。そこで、②におけるエネルギー E_v を、④のようにモータ軸を変位させることで、ばね k が E_v を吸収し放出する。この時点で振動が抑制されることになる。

このアルゴリズムを、過渡振動の生ずるところ、つまり、図8に示すようにモータ駆動加速度の不連続点にて行い、過渡振動の防振を図る。

4.3 実験システムの構成 実験システムの構成は、概略的には3.3節で示したものと同様である。

ただし、簡単のため、本防振制御部をモータドライバの ROM 内部に置かず、パーソナルコンピュータに

図4 水平形アームに対する効果

図5 垂直形アームに対する効果

図6 過渡振動 振動モデル

図7 防振制御アルゴリズム

図 8 防振制御時のモータ加速度

置き C 言語により防振を実現させた。将来的には、これを ROM 内部に組み込む予定である。

4.4 防振の効果 本制御法の効果を図 9 に示す。

ここでは、アーム軸加速度が 12.0 rad/s^2 の場合の結果を示したが、本制御法は、一軸アームにしろアーム軸の全加速度範囲において、また、あらゆる姿勢において十分な効果を示した。数値的に述べれば、残留振動に関しては、アーム先端の振動加速度が 0.1 G 以内になる整定時間が、防振を行わない場合の $1/5$ 程度に抑えられ、また、過渡期におけるアーム先端の最大振動加速度が $1/2$ 程度に抑えられた。

本制御法は、アーム振動系をモデル化し、その運動方程式を解くことにより防振制御を行うため、外乱による影響が大きいと思われるが、シミュレーションおよび実験より、実際のロボットが図 6 に示したモデルに対し $\pm 40\%$ 程度「ずれ」が生じたとしても、本制御法が、逆にアームを強振するようなことのないことが確かめられている。

5. 結 言

機械的な防振法である動吸振器の理論を応用することにより、共振振動、過渡振動に対し、ソフトウェアサーボを用いた開ループ制御による実用的な防振制御法を考案することができた。

(a) 防振制御なし

(b) 防振制御あり

図 9 本制御法の効果

文 献

- (1) 向井・ほか 3 名, 第 14 回技術講演会, No. 860-1, (昭 61), 21.
- (2) 米沢・ほか 3 名, ソフトウェアサーボによるロボットアームの防振制御, 自動制御連合講演会論文集, (昭 61-11), 337.
- (3) 久良・ほか 2 名, 産業用ロボットの防振制御, 安川電機, 46-183 (昭 59).
- (4) 高野, ロボットの運動の高速化技術, 計測と制御, 21-12 (昭 57) 1122.