ロボットアームのモータトルクむらに起因する共振現象の制振制御*

本家 浩一^{*1}, 井上 喜雄^{*2}, 原田 孝^{*2}
白澤 淳^{*3}, 伊藤 廣^{*3}

Active Control of Resonance of Robot Arm caused by Motor Torque Ripple

Koichi HONKE, Yoshio INOUE, Takashi HARADA,
Jun SHIRASAWA and Hiroshi ITO

As the motor which drives a robot arm produces a torque ripple effect, the resulting resonance vibration in the robot arm impedes the robot's high locus precision. To counteract this problem, usig software servo, a correction signal which cancels the torque ripple is fed into the system, and this eliminates resonance vibration. The method for this procedure is presented in this paper. For the derivation of this correction signal, the theory for single-plane balancing of rotor vibration may be applied, which makes it possible to derive the correction signal accurately and systematically. Experimental testing in which this technique was applied to a robot of one degree of freedom was performed. The experimental results adequately verified the effectiveness of this technique.

Key Words: Robot Manipulator, Active Control, Software Servo, Torque Ripple, Resonance Vibration

1. ま え が き

近年のロボット工学の進歩と需要の拡大によりさまざまな分野にロボットの応用が拡大し高速性、高精度性が要求されてきている。特に高軌跡精度化への要求が高まるとともに、ロボット動作時のアーム先端の振動に今まで以上に十分な注意を払う必要があります高ってくる。

さて、サーボモータ駆動のロボットアームでは、モータや減速機にトルクむらが存在し、またアーム系の弾性(減速機弾性等)が無視できないような場合、これらとロボットアームとの共振現象が、軌跡精度向上の障害となることがある。このような問題に関して、減速機のトルクむらによる振動を抑圧する方法として吉谷らの報告⁽¹⁾があるが、ここではモータから生ずるトルクむらによる共振現象について検討する。

トルクむらによる共振現象を抑える方法としては、トルクむら自体を最小限に抑えるなどのアプローチも考えられるが、本報ではトルクむらをソフトウェアサ

ーボによる補正信号のフィードフォワードによってキャンセルすることにより、共振現象を回避する方法について述べる。この補正信号の導出には、ロータ振動における単面修正の理論を応用しており、正確かつシスマティックに補正信号を求めることができる。

2. AC サーボモータのトルクリップル⁽²⁾

AC サーボモータのトルクリップルの原因には、電氣的には三相電流のアンバランス・位相のずれ、機械的にはモータのコギングなどがあるが、ここでは三相電流のオフセット電流により生じるトルクリップルについて述べる。

AC サーボモータのように電源に三相交流を用いる電動機の場合、界磁磁束の分布が正弦波状であると仮定すると、各相に流れる電流によって生じるトルクは次式で表される。

$$T = K\Phi \left\{ i_u \sin \theta + i_v \sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) + i_w \sin \left(\theta - \frac{4}{3}\pi \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

K : 比例定数

i_u, i_v, i_w : 各相の電流

* 原稿受付 平成2年6月27日。

^{*1} 正員、(株)神戸製鋼所機械研究所(〒673-02 神戸市西区高塚台1-5-5)。

^{*2} 正員、(株)神戸製鋼所電子技術研究所。

^{*3} 長岡技術科学大学(〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)

Φ : 磁束

θ : モータの角度位置

u, v, w の各相の電流を次のように制御すると

$$i_u = I \sin \theta$$

$$i_v = I \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$i_w = I \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right)$$

トルクは

$$T = \frac{3}{2} K I \Phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり安定したトルクが得られる。しかしモータ電流がオフセットをもっている場合、例えば u 相電流が

$$i_u = I \sin \theta + \Delta I \quad \dots\dots\dots (4)$$

である場合

$$T = \frac{3}{2} K I \Phi + K \Delta I \Phi \sin \theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

のようにトルクリップルが現れる。

モータが 4 ポールであると仮定すると、式からわかるように、ロータ回転数の 2 倍の周波数のトルクむらが生じる。

本報では、このトルクむらとアームとの共振現象の制振制御について報告する。

3. 制 振 制 御 法

本研究では、先に示した共振問題に対して、加振力を打ち消す信号をフィードフォワード的に入力することにより制振制御を行う。図 1 にそのブロック図を示す。この方法は、フィードバック制御に比べ系の動特性に影響を与えないので、ロボットのようなその応答性・安定性が問題となる機器の場合、非常に有効である反面、入力信号を正確に求められないと、かえって振動を大きくしてしまう結果となる。

そこで、本研究ではこの入力補正信号の導出にロータ振動における単面修正の理論を応用し、正確かつシステマティックに補正信号を求めている。

3・1 補正信号導出法 2 章で示したように、今、問題としている加振力は、モータの回転角度によって決まる正弦波状のものとなる。このことは、回転体のアンバランスフォースと類似しており、ロータ振動の単面修正の理論⁽³⁾が応用できるものと考えられる。一般に、ロータの振動問題ではロータの持っている不釣

図 1 ブロック線図

合いと、測定される振動との関係を表すために影響係数という概念を用いる。これを用いると不釣り合い力を r 、それにより生じる振動応答を U とすると系が線形であるかぎり

$$r = \alpha * U \quad \dots\dots\dots (6)$$

という関係が成り立つ。ここで U, r, α は絶対値と角度を要素とするベクトルで、 $*$ は次のような演算を意味する。

$$|r| = |\alpha| \times |U|$$

$$\angle r = \angle \alpha + \angle U \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、 $r = U/\alpha$ を次のような演算と定義する。

$$|r| = |U| \div |\alpha|$$

$$\angle r = \angle U - \angle \alpha \quad \dots\dots\dots (8)$$

本研究では、トルクむらおよびその補正信号より生じる加振力を U 、これによりロボットに生じる振動を r とおく。次に具体的な方法について述べる。

① 補正信号を与えないで一定速度でアームを動作させ、この時生じる振動を R_1 とする。

② 既知の振幅と位相をもつ適当な補正信号 U_1 を入力して同様に動作させ、この時の振動を R_2 とする。

③ この時 U_1 が振動に及ぼした影響 e は

$$R_2 - R_1 = e \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるから次式が成り立ち、

$$e = \alpha * U_1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

影響係数 α は

$$\alpha = e/U_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。

④ 理想的な補正信号を U とすると、 U により振動を零にするためには

$$R_1 + \alpha * U = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

よって

$$U = -R_1/e * U_1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

を得る。

この U をフィードフォワード的に入力すれば、モータのトルクむらによる振動を低減することができる。

4. 実験システム

本方法の効果を確認するために図 2 に示すような一軸の垂直形のロボットアームにより実験を行った。図 3 に実験装置の構成を示す。機構的には出力 750 W の AC サーボモータに、RV 減速機(減速比 121)さらにアームが結合されたものとなっている。制御回路は、アナログタイプのサーボドライバとパーソナルコンピュータからなっており、電流制御と速度制御をドライバが、位置制御(制御周期 1 ms)をパーソナルコンピュータが行うシステムとなっている。位置制御は、モ

ータについた回転角検出器をセンサとして用いた、いわゆるセミクローズドループとなっている。

パーソナルコンピュータはドライバにモータ位置の目標値と実際の位置との偏差信号、およびトルクむらの補正信号としてモータ回転角にある位相差をもって同期した1回転当たり2回の正弦波を加算したものを速度指令値として出力している。また、モータ位置に対応した正弦波(モータ回転数の2倍周期)を外部に出力しており、振動の位相検出のための基準としている。

アーム先端には振動検出用の加速度ピックアップがついており、この信号とパーソナルコンピュータからの基準信号を2チャンネルのFFTでモニタしている。

図2 実験装置

図3 実験システム

図4 アーム振動の場所による変化

5. 実験結果および考察

5.1 正弦波補正の場合 図4はアームを1回転させたときのアームの先端の振動加速度の波形である。図よりわかるように、モータ回転数の2倍の振動が顕著に生じている。またそのレベルは、アーム回転角によらず一定で、このことはトルクリップルの大きさが、モータトルクの絶対値によらず一定であることを示す。

図5に本制御法の効果を示す。これは、横軸に運転回転数、縦軸に回転数の2倍成分(これを基本成分とする)の振動レベルをプロットしたものである。実線が無制御時の振動で、共振点が16 Hz近傍にあることがわかる。これに対して、先に述べた方法で補正信号を求めるのであるが、比較的振動の大きい14 Hz(840 rpm)で運転し補正信号を求めた。共振点を避けたのは、この近傍では位相が急激に変化し、安定した補正信号が求めにくいからである。また、この方法を数回実行、更新していくことにより、より精度良い補正信号を求めることができる。

この補正信号を用いて各運転周波数での振動レベルを一点鎖線でプロットした。図よりわかるように、どの周波数においても効果が確認される。ただし効果が周波数により多少違うが、これは補正信号を入力している場所が速度指令値で、これがトルクとなるまでに制御回路による周波数依存性があるためである。したがって、より良い効果を広い周波数範囲にわたって得ようとするれば、この補正信号を、よりモータトルクに

図5 基本成分に対するフィードフォワードの効果

図 6 二次成分に対するフィードフォワードの効果

図 8 基本成分に対する効果の慣性モーメントの影響

図 7 三次成分に対するフィードフォワードの効果

近い場所、例えば電流指令値に入力すればよい。ただし、本研究では回路構成の簡便さを考え、速度指令値入力としている。

5.2 く形波・三角波補正の場合 本方法では SIN 信号をソフトで計算またはメモリに記憶しておく必要があるが、よりソフトの負担を軽くするためには、演算量の少ないく形波・三角波を補正信号として用いたほうが良い場合がある。そこで補正信号としてく形波・三角波を用いその効果を確認した。

一般に、振幅 1 のく形波・三角波はフーリエ級数展開することにより次のように表される。

[く形波]

$$y = \frac{4}{\pi} \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

[三角波]

$$y = \frac{8}{\pi^2} \left(\sin x - \frac{1}{9} \sin 3x + \dots \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

式よりわかるようにく形波や三角波を用いた場合、その高調波の影響が問題となってくると考えられる。図 5 の破線・二点鎖線に基本成分の振幅値を示す。これらについては正弦波とほぼ同様の効果が得られている。さらに高調波の影響を図 6、図 7 に示す。二次成分(モータ回転数の 4 倍)については、どちらの波形もこの成分を含まないので影響がない。一方、三次成分(モータ回転数の 6 倍)については正弦波では影響がなく、

く形波・三角波では振動振幅値が増大しており、とくにく形波で顕著である。このことは、先に示したフーリエ展開式からも明らかなことである。ただし、この振動レベルは基本成分と比べると十分小さく、このようにく形波・三角波を用いても十分な効果が得られる。

5.3 慣性モーメントの変化による影響 本方法は、基本的にはトルクむらを相殺する信号をフィードフォワード的に与えているだけであるから、アームの慣性モーメントの変化など、機械系の動特性の変化があっても関係されないものである。図 8 にその結果を示す。これは、アームの慣性モーメントを 139.0(kgf²cm)として補正信号を求め、この補正信号を用いて慣性モーメントが 73.0(kgfs²cm)の時の効果を確認したものである。図よりわかるように、ほとんど同様の効果が得られている。このことは、実際のロボットのようにその姿勢により系の動特性が大きく変化する場合においても、十分な効果を発揮するものと思われる。

6. 結 言

モータのトルクリップルを原因とするロボットアームの共振現象について、1 自由度ロボットアームを用いて、フィードフォワードによるトルクリップルバランス制御を試み、ハードウェアの改造なしで、ソフトウェア上の変更のみで、振動を低減できることができた。フィードフォワードする補正信号の導出に、ロータ振動の単面修正理論を応用し、その効果、有用性が確認した。また、補正信号として、正弦波のほかに、三角波・く形波を用い十分な効果が得られることがわかった。

文 献

- (1) 吉谷・ほか 3 名, 機講論, No. 860-1 (1986-1), 21.
- (2) 三輪・下村, 回転機械のつりあわせ, (1976), 209, コロナ社.
- (3) 林, 神電技報, No. 118 (1988), 108.