減速機を含む速度制御系における振動の抑制*

イヴァン ゴドレール** 大西公平*** 山下 忠†

Vibration Suppression for a Speed Control System with Gear

Ivan Godler, Kouhei Ohnishi and Tadashi Yamashita

Drive units for robots and other automatic machines are generally composed of a motor and a reducing gear. Such units with inertia load show vibrational response to the reference change as well as to the load variation. In order to improve response speed and accuracy of the machines, these vibrations have to be suppressed. Many control methods successfully deal with the problem, but most of them are difficult to be practically realised or have a disadvantage of a needed high degree of knowledge for the controller design. An aim of the present research is a design of a simple but effective method for a vibration suppression. In this purpose a disturbance rejection control is used for motor and thus a dynamically decoupled motor and load system is obtained. The decoupling enables a simple design of a feedback loop for the vibration suppression. This paper discusses about the design of the feedback loop and its effect on the system's transient response.

Key words: vibration suppression, disturbance observer, feedback control

1. はじめに

電気モータの回転数を機械系に整合するように減少すると同時に最終軸出力トルクを増幅し、さらに位置決め分解能を高めるために、減速機を含むアクチュエータユニットがロボットなどの自動化機械の駆動系に使われている。しかし、減速機の導入に伴い、全体の剛性が下がり駆動系が過渡状態で振動することがある。このため制御系の動特性を改善し、何らかの方法で振動を抑えることが重要課題となっている。

負荷をモータに直付けにして直接駆動する場合には剛性が高く、振動が発生しにくくなるため、ロボットの駆動系にもダイレクトドライブモータが使われている。ところが近年ではロボットの機構が柔軟化する傾向があるので、ダイレクトドライブ駆動系でも制振特性が問題になることがある。従って、振動抑制制御の研究が活発化し、有効な方法が幾つか提案されている^{1)~4)}。しかしながら、実用的な見地からは実現が困難であったり、設計に高級な知識が必要であったり、複雑な制御構造をとる割には制振効果が薄いといった様々な欠点を持つことが多いように思われる。

本研究の目的は上記のような欠点が少なく、簡単でしかも効果的な振動抑制方法を開発することにある。ここで提案する制御方法ではモータに外乱抑制制御⁵⁾⁶⁾を適用することを重要な前提条件としている。外乱抑制の効果によってモータと負荷の動的な干渉がなくなり、モータがノミナル特性を保持するのでフィードバックループの設計がより簡単になるのである。

金子ら¹⁾は負荷側にも外乱オブザーバを適用し、その出力をフィードバックさせる方法を提案した。この方法では負荷外乱オブザーバの状態変数として測定のむずかしい軸のねじれひずみと回転角度を利用している。一方、Ohshioら²⁾が提案する方法では、フィードバックループのパラメータの演算が比較的

複雑であるので、実現が困難であると思われる。

本論文で提案する制御方法では、軸のねじれの検出が不要で、速度の検出のみで振動の抑制制御ができることとフィードバックループに導入するパラメータの演算が簡単であることが特長である。考察する速度制御系を第2章で説明し、第3章ではモータに適用する外乱オブザーバコントローラの効果について簡単に述べる。提案する振動抑制フィードバックループの構成を第4章で紹介し、続く第5章でノッチフィルタの考え方を用いて制振効果を解析する。また、DC ブラシレスモータによる速度制御系のステップ応答実験を例にとり本制御方法の有効性を確認する。最後に、フィードバックループのパラメータの設定手法について述べる。

2. 速度制御系

本論文で考察する制御系は図1に示すような速度制御系である。記号の意味は次の通りである。

ω_R : 速度指令	θ_M : モータの回転角度
G_C : コントローラの伝達関数	N : 減速比
i_M : モータのトルク電流	θ_L : 負荷の回転角度
K_T : モータのトルク定数	K_S : 減速機の弾性
T_M : モータのトルク	T_L : 負荷のトルク
T_I : モータのトルク外乱	T_D : 負荷のトルク外乱
J_M : モータの慣性	J_L : 負荷の慣性
D_M : モータの粘性摩擦	D_L : 負荷の粘性摩擦
ω_M : モータの回転速度	ω_O : 出力軸の回転速度
s : ラプラス演算子	

図1の系の極数はコントローラの伝達関数 G_C を除くと残り3つである。この3つの極の内、二つが共役虚数である場合には、系が過渡状態で振動することになる。本研究の目的はこの振動の抑制である。

3. モータの外乱抑制制御

モータは摩擦などの内部外乱と外部からのトルク外乱 T_I を

* 原稿受付 平成5年3月5日

** 正会員 (株)ハーモニックドライブシステムズ(長野県南安曇郡穂高町大字牧1856-1)

*** 正会員 慶應義塾大学(横浜市北港区日吉3-14-1)

† 九州工業大学(北九州市戸畑区仙水町1-1)

Fig. 1 Block diagram of the speed control system

Fig. 2 Motor disturbance rejection control

Fig. 3 Motor with nominal dynamics

Fig. 4 Block diagram of dynamically decoupled system

$$\frac{\omega_O}{\omega_R} = \frac{N^{-1}K_P K_{T_n} K_S}{J_L J_{M_n} s^3 + [J_L K_P K_{T_n} + J_{M_n} D_L] s^2 + [D_L K_P K_{T_n} + J_{M_n} K_S] s + K_P K_{T_n} K_S} \quad (1)$$

受ける。更に、減速機を通じて負荷や減速機内で発生するトルクもモータの外乱になる（図1の*印ループ）。従って、負荷側のトルク変動によるモータの回転速度への影響が現れる。これはモータと負荷の動的な干渉であり、望ましくない効果である。モータ側のループゲインの上昇によってこの干渉は小さくなるが、安定性の確保のためにはループゲインには限界があり、十分な効果を得ることは困難である。そこで、モータの制御剛性を上げるためにゲイン調整以外に、外乱オブザーバを用いた制御方法を取り入れる⁵⁾。この方法では、図2のように外乱トルクをモータの回転速度と電流から推定する。（ここで、 n はノミナルパラメータを示す。）求められたトルク外乱値を電流指令に変換してモータの電流指令 i_{ref} に加えることによって外乱の抑制ができる。実際の制御系では高周波ノイズの悪影響を除くため低周波数領域通過フィルタ G_F を追加する。このフィルタのカットオフ周波数を高くとることにより、制御系の周波数帯域幅以内ではフィルタのゲインが1と見なせるので、図3の等価ブロック線図に示すように充分な外乱抑制効果が得られる。

上述のモータの外乱抑制制御がロバスト性を高めるのに効果的であることが知られている^{5) 6)}。ここでは、外乱と共に負荷トルクの影響が抑制されている点と、モータがオブザーバで定められたノミナルパラメータで応答するようになる点に着目する。すなわち、前者の性質によってモータと負荷の干渉がなくなり、後者の性質によってモータの伝達関数が正確にノミナル化（あるいは公称値に固定化）されているのである。この

二つの性質を振動抑制ループの設計に利用する.

図2の外乱抑制ループを図1の速度制御系に適用すると、前述した外乱抑制制御の性質により図4に見られるようなモータと負荷の非干渉制御系が得られると同時に、自動的に並列積分要素が入り、ステップ入力に対し、定常偏差が0になる。従って、モータのコントローラに積分が不要になり、比例制御だけで定常偏差を除去することができる。コントローラの伝達関数を比例ゲイン K_P で表し、制御系の ω_R から ω_O までの伝達関数は式(1)のようになる。

外乱抑制制御の適用で出力軸の振動がどうなるかについて簡単に述べよう。図4に示すようにモータと負荷の間に干渉がなくなるために、振動のエネルギーが負荷側に閉じ込められ、振動が負荷の自然なダンピングだけで減衰されることになる。すなわち、モータの外乱抑制制御だけでは負荷の振動は減衰しない。しかし、モータの制御剛性が改善されるためにモータが指令に厳密に追従するので、適切な制御方式を用いれば負荷の振動を積極的に抑えることが可能となるのである。

4. 振動抑制制御ループの提案

モータと負荷の干渉がない場合には、図 4 に示す制御系の過渡振動の抑制は結果的に負荷側のダンピングの調整と等価である⁷⁾。従って、制御系に追加するフィードバックループの目的は負荷側のダンピングの調整である。提案するフィードバックループを含む速度制御系のブロック線図を図 5 に示し、 ω_R から ω_0 までの伝達関数を式 (2) で表す。

Fig. 5 Control system with vibration suppression feedback loop

$$\frac{\omega_O}{\omega_R} = \frac{N^{-1} K_P K_{Tn} K_S}{(J_L + J_{Lf}) J_{Mn} s^3 + [(J_L + J_{Lf}) K_P K_{Tn} + J_{Mn} (D_L + D_{Lf})] s^2 + [(D_L + D_{Lf}) K_P K_{Tn} + J_{Mn} K_S] s + K_P K_{Tn} K_S} \quad (2)$$

提案するフィードバックループによって、負荷のダンピングと慣性の調整がそれぞれ独立に行われ得ることが式(2)から示唆される。すなわち、式(1)と比べて、負荷側のパラメータ J_L と D_L の項にフィードバックループのパラメータ J_{Lf} と D_{Lf} がそれぞれ加算的に追加されるので、ダンピングと慣性の任意な調整が可能となる。(ここで $K_{Sf} = K_S$ と仮定する。) 提案するフィードバックループの興味深い効果として、振動の抑制に加えて、振動の周波数の調整もできることである。

提案したフィードバックループに微分が3か所にあるので、低領域通過フィルタの追加が必要になる。また、微分と低領域通過フィルタの組合せは、1次遅れフィルタを用いて疑似微分として実現可能なので⁶⁾、図5では単に s と表現している。

5. フィードバックループの特徴

提案する振動抑制フィードバックループの特徴を明らかにするために、モータとコントローラを含めた伝達関数 G_M を

$$G_M = \frac{K_P K_{Tn}}{J_{Mn} s + K_P K_{Tn}} \quad (3)$$

で表し、減速機を含めた負荷側の伝達関数 G_L を

$$G_L = \frac{N^{-1} K_S}{J_L s^2 + D_L s + K_S} = \frac{B_L}{A_L} \quad (4)$$

と書く。フィードバックループ内の、負荷に関する項目を式(5)の G_{Lf} で表す。

$$G_{Lf} = \frac{N^{-1} K_{Sf}}{J_{Lf} s^2 + D_{Lf} s} = \frac{B_{Lf}}{A_{Lf}} \quad (5)$$

このように書くと系のブロック線図は図6のように簡潔に表現できる。フィードバックループにモータの逆伝達関数が入っていることはこの制御系の重要な特徴である。第3章で述べたモータの外乱抑制制御の効果のために、モータの伝達関数が正確にノミナル化でき、フィードバックループにモータモデルの逆伝達関数が挿入できるのである。モータの伝達関数とフィードバックループ内の逆伝達関数が互いに打ち消されることを考慮すると、指令 ω_R から出力 ω_O までの伝達関数 G として式(6)を得る。

$$G = \underbrace{\frac{G_{Lf}}{G_L + G_{Lf}}}_{G_N} G_M G_L \quad (6)$$

ここで、 G_N は振動を抑えるノッチフィルタとなるが、分母に負荷の伝達関数が入っているので、通常のノッチフィルタと異

Fig. 6 Closed loop system

なった性質を持つ。解析をするために伝達関数 G_L と G_{Lf} を分母 A と分子 B にそれぞれ分ける(式(4)と式(5)参照)。両分子に弾性係数と減速比だけが入っていることに注目する。弾性係数は一般に測定可能な物理量であるが、測定誤差や弾性の非線形性などのために、フィードバックループに設定する弾性定数 K_{Sf} が実際の弾性と異なることがある。これを式(7)のように考慮する。

$$B_L = \alpha B_{Lf} \quad (7)$$

ここで、 α は誤差を表す未知な無次元の正のパラメータである。

式(4)、式(5)と式(7)を式(6)に代入すると、入力から出力までの伝達関数が式(8)のようになる。

$$G = G_M \underbrace{\frac{B_L}{A_L + \alpha A_{Lf}}}_{G_{Ln}} \quad (8)$$

式(8)では、式(6)のノッチフィルタ G_N と負荷 G_L の複合で新しい負荷 G_{Ln} が構成される。その伝達関数の分母に負荷の伝達関数の分母とフィードバックループの G_{Lf} の分母の合計が入っていることが特徴である。すなわち、フィードバックループパラメータの調整により、負荷の動的な特性を任意に変えることができるのである。ここで、未知なパラメータ α がフィードバックループのゲインになるので、ループの効果を左右するが、 α の限界値をパラメータの設定のときに考慮すれば、 α の変動に対してのロバスト性が得られる。

α を用いた制御系の安定解析として、田中⁸⁾が提案する方法がある、その詳細はここでは省略する。

6. 実験の結果

DC ブラシレスサーボモータとハーモニックドライブ減速機 ($N = 100$) を用いて、速度制御系のステップ応答の実験を行った。モータの外乱抑制制御と負荷の振動抑制フィードバックループはデジタルシグナルプロセッサを用いて実現した。

モータのコントローラにPI制御を使ったときのステップ応

Fig. 7 Step response with PI controller

Fig. 8 Step response with motor disturbance rejection

Fig. 9 Step response with varying inertia parameter

Fig. 10 Step response with varying damping parameter

答を図 7 に示す。負荷のトルクの影響で、モータの速度応答がノミナル応答と異なり、かつ負荷の過渡振動も現れる。

モータに P 制御と外乱抑制制御のみを考慮した系のステップ応答を図 8 に示す。モータの応答に負荷トルクの影響が小さく、モータの応答はノミナル応答に近い。しかし、出力軸の過渡振動の減衰は図 7 と比べて低くなっていることが観察できる。

次に、制御系に振動抑制フィードバックループを追加した実験結果を示す。図 9 と図 10 に示すように、過渡振動の周波数とダンピングの調整ができることが分かる。図 9 では $D_{Lf} = 0$ として、フィードバックループの慣性パラメータ J_{Lf} の調整を行っている。制御系の固有周波数が慣性パラメータによって変化し、 J_{Lf} が大きくなると振動の周波数が下がっている。図 10 の場合には、慣性パラメータをゼロにして ($J_{Lf} = 0$)、ダンピングパラメータ D_{Lf} を調整している。このパラメータの変化によって、系のダンピングが変化し、過渡振動の効果的な抑制ができる。図 11 には過渡振動が少なく、応答が速いときの出

力軸の速度とモータ軸の速度のステップ応答を示す。ここで、過渡状態以降に現れる速度の変動は減速機内の角度伝達誤差のために発生する成分である。その原因は組立て精度や歯切れ精度にあり、本制御方法で取り除くことが不可能である。提案するフィードバックループの二つのパラメータで振動の周波数とダンピングの調整が独立的にでき、振動の抑制に有効な制御方法であることが示された。

7. フィードバックループパラメータの設定方法

図 4 の制御系においてはモータと負荷の干渉がないため、出力軸の速度応答はモータと負荷のカスケード系の応答になる。負荷側が二次系である場合には、固有周波数 ω_n とダンピング係数 ζ を式 (9) から求められる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S}{J_L}}, \quad \zeta = \frac{D_L}{2\sqrt{K_S J_L}} \quad (9)$$

この制御系に図 5 で示した振動抑制フィードバックループを追加すると、負荷の全体の慣性 J_{Ln} とダンピング D_{Ln} が式 (10)

Fig. 11 Step response with $D_{Lf} = 700\text{Nms}$

のようになる。

$$J_{Ln} = J_L + \alpha J_{Lf}, \quad D_{Ln} = D_L + \alpha D_{Lf} \quad (10)$$

従って、振動抑制制御の適用で振動の周波数とダンピング係数が式(11)のようになる。

$$\omega'_n = \sqrt{\frac{K_S}{J_{Ln}}}, \quad \zeta' = \frac{D_{Ln}}{2\sqrt{K_S J_{Ln}}} \quad (11)$$

フィードバックループのパラメータ値の決定は以下のように行えばよい。目標の ω'_n , ζ' の値より、式(11)によってまず J_{Ln} , D_{Ln} を求める。つぎに、 α の変動幅を考慮して、式(10)より J_{Lf} , D_{Lf} をそれぞれ求める。このときは α の下限値を考慮すれば、 α の変動があっても、目標以上のダンピングが得られる。一方、 α の上限値を考慮する場合には、目標以下のダンピングが得られるので、 α の変動に対してのある程度のロバスト性が簡単に得られる。

8. おわりに

速度制御系を対象にして、過渡状態の機械的な振動の問題を

考察した。振動は制御系の性能の悪化につながるもので、何らかの方法で抑えなければならない。本研究では出力軸の速度の測定が可能と仮定し、新しいフィードバック制御方法を提案した。本論文ではその構成と効果について述べた。

提案する振動抑制制御方法の特徴は比較的単純な制御系の構成でありながら、制振効果が大きい点にある。この効果を得るために、モータのコントローラに外乱抑制制御を適用した。外乱抑制の効果によりモータと負荷の動的な干渉がなくなること、およびモータがノミナル系にモデル化されることを振動抑制フィードバックループの設計に利用した。

振動抑制フィードバックループにモータの逆伝達関数と負荷モデルの持つ慣性値やダンピング値を調整パラメータとして使用すれば、振動のダンピングと周波数の独立的な調整が可能になる。このパラメータの設定方法が単純であることもこの制御方法の特徴である。

負荷のパラメータの測定誤差と変動を考慮するために一つのパラメータを導入した。このパラメータを用いれば、負荷の変動に対してのある程度のロバスト性が得られる。

速度制御系と二次系の負荷を用いて、提案した振動抑制制御方法の有効性を実験で確認したが、位置決め制御系や異なる次数の負荷などにも本制御方法が適用できるものと期待している。

参考文献

- 金子健二, 大西公平: フレキシブルジョイントのモーションコントロール, Trans. of IEE Japan, **111-D**, 4 (1991) 282.
- M. Ohshio, Y. Iwata, N. Suzuki, K. Uchida and H. Yamazoe: Active Control for Precision Vibration Isolation Systems, Proc. 1st Intl. Conf. on Motion and Vibration Control, **1**, 1, (1992) 218.
- 羅正華: 歪みフィードバックによるフレキシブルロボットアームの制御の理論的実験的考察, 計測自動制御学会論文集, **28**, 1 (1992) 67.
- K. L. Hillsley and S. Yurkovich: Vibration Control of a Two-Link Flexible Robot Arm, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, (1991) 2121.
- M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi: A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, (1987) 326.
- S. Komada and K. Ohnishi: Force Feedback Control of Robot Manipulator by the Acceleration Tracing Orientation Method, IEEE Trans. Ind. Electr., **37**, 1, (1990) 6.
- I. Godler, J. Sakata and K. Ohnishi: Suppression of Mechanical Vibration in a Transient State, Proc. 1st Japanese-French Congress of Mechatronics, (1992) 195.
- 田中泰太郎: ロバスト制御系設計のための α パラメータ, 計測自動制御学会論文集, **28**, 12 (1992) 1501.