

# 軸ねじれ系のさまざまな制御法

堀 洋一（東京大学）

## Introduction to Control of Torsional Vibration System

Yoichi Hori (University of Tokyo)

**ABSTRACT:** Vibration suppression and disturbance rejection control of vibrational system is one of the important problems in the future motion control. It originates in the steel rolling mill system, where the load is coupled to the driving motor by a long shaft. As the newly required speed response is very close to the resonant frequency of such systems, only the conventional techniques based on P&I control are not effective enough. In this paper and symposium, various new control strategies proposed until now are reviewed and future direction will be discussed.

### 1. 振動の制御は重要なテーマ

振動の制御は、狭い意味でのモーションコントロール分野だけでなく、広く工学分野全体においてかならず重要になる技術である。

圧延機の駆動系、ステッパなどの精密位置決め装置、ロボットアーム、高層ビル、宇宙ステーション、エレベータ・鉄道車両・航空機などの乗り心地改善、自動車のアクティブサスペンション、アクティブパンタグラフ、電力系統・・・と数え上げればきりが無い。

振動の制御はこれらに共通する基盤技術であるにもかかわらずあまりうまくいっていないようである。例えば、ロボット工学は高度に発達しつつあるように見えるが、実は、アームのふるえを止めることすら満足にできないでいる。

本稿では、圧延機などの産業用ドライブを念頭におきながら、振動抑制と外乱抑圧に関する基本的な考え方を述べ、将来の研究動向をさぐってみたい。

### 2. 圧延機駆動系と2慣性モデル

典型的な圧延機駆動系の構成を図1に示す。電動機の交流化によって速度応答が向上し、軸系のねじれ振動を考慮した設計が必要とされている。

図2に示す2慣性系は、振動の1次モードまで考えた最も単純なモデルで、伝達関数ブロックは

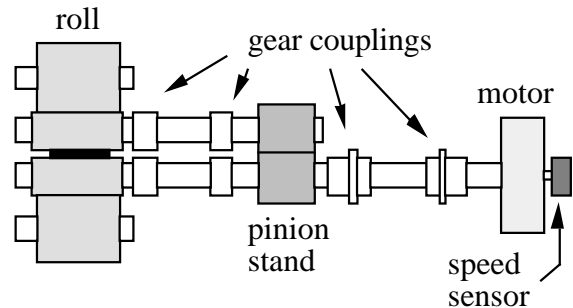


図1 圧延機駆動系

Fig.1 Steel Rolling Mill System.

図3のようになる。状態方程式は、

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_M \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\omega}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-B_M}{J_M} & \frac{-K_s}{J_M} & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \frac{K_s}{J_L} & \frac{-B_L}{J_L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_M \\ \theta_s \\ \omega_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} T_M + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_L} \end{pmatrix} T_L \quad (1)$$

で与えられる。入出力間の伝達関数行列は、

$$\begin{pmatrix} \omega_M \\ \omega_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_M \\ T_L \end{pmatrix} \quad (2)$$

であり、たとえば、閉ループ特性に重要な意味を

もつ $G_{11}(s)$ は,

$$G_{11}(s) = \frac{1}{s} \frac{J_L s^2 + K_s}{J_M J_L s^2 + K_s (J_M + J_L)} = \frac{1}{J_M s} \frac{s^2 + \omega_a^2}{s^2 + \omega_r^2} \quad (3)$$

で与えられる．ボデー線図は図4のようになり，共振周波数，反共振周波数

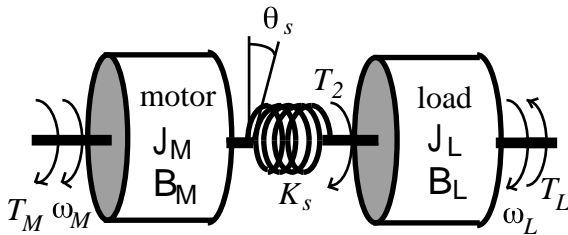


図2 2慣性系

Fig.2 2-Inertia System.

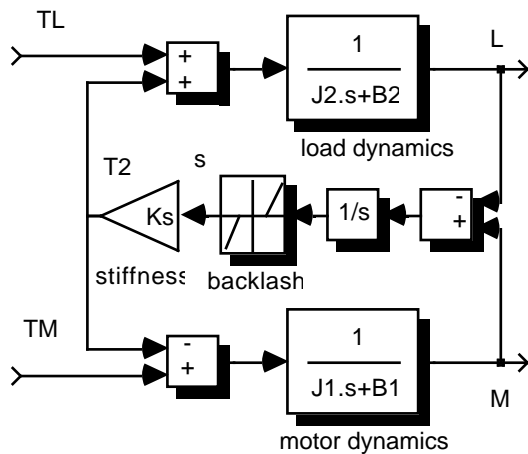


図3 2慣性系のブロック線図

Fig.3 Block Diagram of 2-Inertia System.

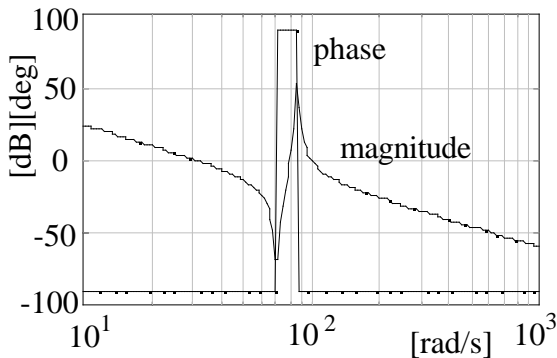


図4 2慣性系のボデー線図

Fig.4 Bode Diagram of 2-Inertia System.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{K_s}{J_L} \left(1 + \frac{J_L}{J_M}\right)} \quad (4), \quad \omega_a = \sqrt{\frac{K_s}{J_L}} \quad (5)$$

において位相特性が大きく変化する．

### 3. 諸種の2慣性系制御法

われわれの目的はモータ速度 $\omega_M$ のみを観測しモータトルク $T_M$ を制御して，負荷速度 $\omega_L$ を振動なく速度指令に追従させること，外乱トルク $T_L$ の影響をできるだけ小さくすることである．制御の難しさや手法の違いは慣性比 $R=J_L/J_M$ によって大きく異なる．<sup>[1]</sup>ここではまず，文献[2][3]にまとめた諸手法の概要を述べる．

#### (1) PI速度制御器

バネが無限に固いとした1慣性系に対して設計したPI速度制御器をそのまま用いると，速度応答は振動的で外乱の影響も大きい．2慣性系に適用しようにもどうしたものかよくわからない．

#### (2) 速度微分フィードバック

振動抑制の基本は加速度のフィードバックである．フィードバックゲインを適当に調節すれば，かなり良好な振動抑制効果がある．最適なゲインの大きさや符号は慣性比 $R$ の関数になる．

#### (3) モデル追従制御

SFC (Simulator Following Control) はパラメータ変動や軸ねじれ振動を適度に抑制できる実用的な手法である．振動要素をもたない規範モデルの出力と実速度の差にゲインをかけてトルク指令に加算する．その大きな特長は，SFCが全くのオプションであって，現場で効果を調整できる点にある．藤川らの微分を用いない外乱オブザーバの構成法により，両者が等価であることが明らかになった．

小山の提案した2段階制御とも呼ぶ手法では二つの速度制御器を用いる．制御器1は系を安定化する低ゲイン制御器で，振動要素のないモータモデルを制御する制御器2のトルク指令を実系にも用いる．実系とモデルの差は外乱推定器とよぶPI制御器を通じてフィードバックされている．

#### (4) 外乱オブザーバの利用

外乱オブザーバの目的は1慣性系での外乱トルクやパラメータ変動の補償であり、そのまま2慣性系に適用すると負荷慣性とバネによる大きな振動を誘発する。しかし、推定外乱に1以下のゲインを介してフィードバックしたり、オブザーバのカットオフ周波数を工夫したりすれば振動抑制にも非常に効果があることがわかってきた。

海田の『遅い外乱オブザーバ』では、外乱オブザーバのカットオフ周波数を反共振周波数のやや下という非常に遅いところに設定することにより、トルク指令には進み補償、軸トルクからは微分フィードバックを行っている。多慣性系にも有効である。岩田はその理由を明らかにしている。

結城の提案になる共振比制御は『速い外乱オブザーバ』を用いる。推定外乱の1/H倍をトルク指令にフィードバックすることにより、モータ慣性のみが1/H倍になり共振周波数や共振比を制御できる。PD位置制御系やPI速度制御系において、 $R=\sqrt{5}$ 付近で良好な振動抑制が達成できることが示されており、これからの振動抑制に大きなヒントを与えている。

#### (5) 状態フィードバック

状態フィードバックによって系の極を安定化すれば当然、振動抑制に効果がある。測定できるモータトルクとモータ速度のみを用い、オブザーバによって残りの状態変数を推定する。SFLAC (State Feedback and Load Acceleration Control) がその代表であり、振動抑制と外乱抑圧を行うために外乱を同時に推定している。

久保・Dhaouadiは、二つのオブザーバを用いて高次振動モードを抑制する制御法を提案している。速い軸トルクオブザーバと遅い2慣性オブザーバの両方で推定される外乱トルクの差は、高次振動モードや等価的な非線形トルク成分を表わすから、これをフィードバックすることにより高次振動モードやバックラッシュの抑制が可能になる。

#### (6) H 制御とμシンセシス

H 制御はモデル化誤差を積極的に扱う手法であり、通常2慣性系がノミナルモデル、高次モード

がモデル化誤差となる。

大内らは、H 制御理論とCADを用いて、軸ねじれ系に有効な速度制御器が簡単に設計できることを示した。得られたH 制御器は、共振周波数付近でPI制御器に位相進み補償が付け加わった構造になる。ノッチフィルタなどは現われない。

μシンセシスはパラメータ変動がある場合の制御性能をも保証する。通常のH 制御から出発して2~3回のDK-iterationで結果を得るものが多い。制御器の次数は非常に大きくなるので低次元化が必要である。平田らは、ディスクリプタ表現を用いてパラメータ変動をタイトにモデル化し、μシンセシスの特徴をよく生かした設計に成功している。

H 制御では評価する信号の選択と重みの選定が死命を決する。星野らはモード展開形のモデルを用い0次と1次モードのみを考慮してフィードバック制御器を設計したあと、0次から2次モードまでを考えてフィードフォワード制御器を設計して目標値応答を指定している。前者は、外乱抑圧・1次モード抑制・定常偏差の低減・ロバスト安定性に着目して重みを決める。後者は、1次と2次の振動モードの抑制・定常偏差の抑制・ロバスト安定性を考えて評価量を選択している。

H 制御では非常にわかりやすいものでも、このような多くの設計要因を考慮する必要がある。たしかに良い性能は得られるが、誰でもが短時間で設計できるかどうかは疑問である。

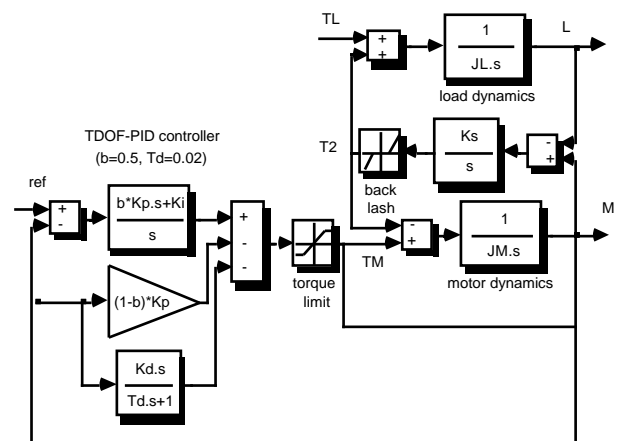


図5 PID制御のみによる2慣性系制御

Fig.5 2-inertia System Control only by a PID Controller.

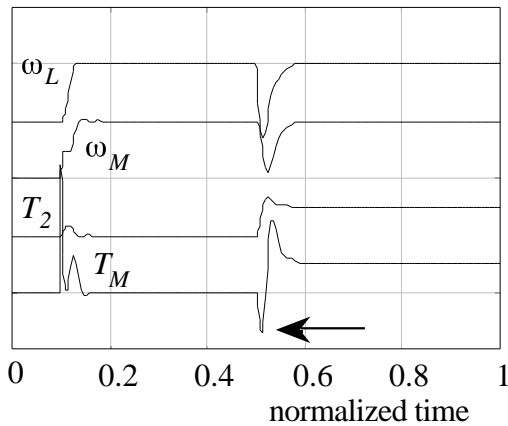


図6 PID制御のみによる2慣性制御の結果  
 Fig.6 Result of 2-Inertia System Control only by a PID Controller.

#### 4. これからの軸ねじれ系制御

最近筆者は、PID制御のみで2慣性系を制御してみた。<sup>[4]</sup> 図5に示すようにその構成はきわめて簡単である。微分項の大きさが慣性比 $R=J_L/J_M$ の関数となる。  $R < 11/5$ では加速度の正帰還が効果的となり、この場合、振動抑制と外乱抑圧が矛盾する制御要求であることを意味している。

図6は慣性比 $R=J_L/J_M=0.2$ の場合のシミュレーション例である。外乱トルクが印加された $t=0.5$ でモータトルクがいったん大きく引いている。いい制御系は同じような応答を示すが、制御器を見ただけではなかなかわからない。いずれにしても、このような基礎知識の積み重ねが重要であると思う。

どのような制御法でも、速度指令とモータ速度にもとづいてモータトルクを作る点は同じである。

複雑な手法に進む前に、次のようなことを押えるのもまた重要である。

- ・ 設計法が明快であること
  - ・ 現場の調整がやさしいこと
  - ・ 制御器の次数が高くないこと
  - ・ バックラッシュやトルクリミットに強いこと
- さらに、筆者は、
- ・  $n$ 慣性系のコントローラは、 $n-1$ 慣性系のコントローラ+ という構造をもつこと
  - ・ 制御対象の特性を生かし、無理することなく制御対象と共存すること

・ 適応的手法との相性がいいことを付け加えたい。これらはとりもなおさず、わかりやすい制御器を作ることに通じる。

現在、与えられた系に対して最も優れた特性が得られるのは、よく調整されたH制御や $\mu$ シミュレーションであることは間違いない。しかし、ベンチマーク問題で競争するならば、異なる定数をもつ多くのシステムに対して、限られた時間内で制御器を設計する指針を示せなくてはならない。

こういった点ではPID制御のような慣れ親しんだ設計法に軍配があがる。一つだけの高性能を目指すものと、不特定ユーザを対象とする産業用で設計法が異なるのはむしろ当然である。

#### ----- 参考文献 -----

- [1] 小山他, "低剛性な負荷機械を駆動する電動機の各種速度制御系の特性比較", 電学論D, Vol.107, No.8, pp.1010-1017, 1987
- [2] Y.Hori, "Comparison of Vibration Suppression Control Strategies in 2-Mass Systems including a Novel Two-Degrees-Of-Freedom H Controller", IEEE 2nd AMC Workshop, pp.409-416, 1992
- [3] 松井・堀, "モータコントロールの新しい技術", 電気学会論文誌, Vol. 113-D, No.10, pp.1122-1137, 1993
- [4] 堀, "PID制御のみによる2慣性系の制御", 平成6年電気学会全国大会, No.670, 1994

【注】著者の個人名を用いて文中で引用したものと文献に関する情報は参考文献[3]の巻末文献リストを参照していただきたい。その多くは本シンポジウムにおいて発案者自身によって説明される。

また本シンポジウムでは、柔軟アームの制御において指令値のプロファイルを考える方法(機械系の制御ではむしろ標準的なやり方)、難しいとされる2慣性系のパラメータ同定に関する二論文が発表される。いずれも、既存の制御理論をそのまま適用するのではなく、実システムの事情に応じてさまざまな工夫がなされている。工学ならではの醍醐味を味わっていただきたい。