フレキシブルジョイントの モーションコントロール

正員 金子 健二 (機械研)

正員 大西 公平 (慶応大)

Motion Control of Flexible Joint

Kenji Kaneko, Member (Mechanical Engineering Laboratory), Kouhei Ohnishi, Member
(Keio University)

This paper proposes an advanced control of flexible joint. Industrial robots generally have the elastic elements in the torque transmission. The torsional vibration is caused when the motion response is fast. This vibration deteriorates the motion of the joint. In the flexible joint control, it is important to increase the stability of the system in the wide motion range. In the proposed method, to obtain the stability of the system, state feedback is applied. For the purpose, the concept of an acceleration controller of the motor axis is applied. This controller is realized by the disturbance observer. The proposed method brings more robust control and the paper also shows the experimental results.

キーワード：フレキシブルジョイント，外乱オブザーバ，加速度コントローラ，状態フィードバック

1. ま え が き

現在広く用いられている産業用ロボットのハーモニックドライブ減速機は弾性要素であり，高速軌道制御では関節角にねじれ振動が発生する。これは軌跡精度の劣化を引起し，場合によっては安定性も損なわれることがある。このような高速ロボットの軌跡制御の質を高めるためには関節角度の防振制御が必要である。これまで状態フィードバックを適用した制御法が幾つか提案されてきているが，どれも多大な計算時間を必要とするばかりか，ロボット運動の応用に適しているとは言い難い^{(1)~(3)}。

本論文では，関節に作用する干渉力外乱を考慮に入れた高精度なフレキシブルジョイントの防振制御を提案している。提案する方法の特徴はロボット運動のロバスト性能と関節角度の防振制御を独立に設定できる点にある。外乱抑圧とパラメータ変動に対するロバスト性はロボットアクチュエータ軸と関節駆動軸に作用する干渉力をオブザーバにより推定しフィードバック

することにより獲得される。防振制御は関節軸に作用するフレキシブルジョイントからの反作用力をオブザーバで推定し，フィードバックすることにより獲得される。その結果，アクチュエータ軸のパラメータはオブザーバで定めるノミナル値に固定化され，逆システムが単なる直列微分要素となるので関節駆動軸のパラメータ変化による共振周波数変化に対しても振動性能が劣化しない特徴を有する。

本手法の有効性は1自由度のフレキシブルジョイントの実験により確認されたので報告する。

2. フレキシブルジョイントの制御

フレキシブルジョイントを制御するにあたりシステムの安定性を向上させることが重要な問題となる。本論文では，各関節に対して状態フィードバックを適用することにより電氣的にダンピングを獲得し，振動を抑制している。そのためには，外乱オブザーバにより実現されるモータ軸の加速度コントローラが必要不可欠であり，〈2・1〉節で取上げている。

図 1 フレキシブルジョイントのモデル図

Fig. 1. Model of flexible joint.

図 2 オブザーバにより補償されたサーボ系

Fig. 2. Compensated motor portion by the disturbance observer.

図 3 モータ軸の加速度コントローラ (\$\alpha=1\$ に対する図 2 の等価図)

Fig. 3. Acceleration controller of motor axis (equivalent performance of Fig. 2 when \$\alpha\$ is unity).

<2・1> モータ軸の加速度コントローラ 本節ではモータ軸の加速度コントローラの実現法について説明する。

フレキシブルジョイントのモデル図を図 1 に示す。ハーモニックドライブ減速機がもつ弾性要素をばね係数 \$k\$ でモデル化している。また、ばね係数 \$k\$、アームの慣性モーメント \$J_a\$、アームの回転角度 \$\theta_a\$、負荷トルク \$T_{im}\$ は、モータ軸に換算した値で表記している。この図より、モータ軸に作用する外乱トルク \$T_{dis}\$ を (1) 式のように定義する。

$$\begin{aligned}
 T_{dis} = & (J_m - J_{mn})s^2\theta_m + D_ms\theta_m + T_f \\
 & + (K_{tm} - K_t)I_a^{ref} + k(\theta_m - \theta_a)
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、\$J\$：慣性モーメント、\$D\$：粘性定数、
 \$K_t\$：電動機のトルク定数、\$k\$：ばね係数、\$\theta\$：

回転角度、\$s\$：ラプラス演算子、\$n\$：ノミナル値、\$m\$：モータ側のパラメータ、\$a\$：フレキシブルジョイント側のパラメータ

\$T_{dis}\$ は (1) 式の右辺に示されるような 5 項の和で表される。第 1 項はモータの自己慣性の変動により生じる慣性力、第 2 項は粘性力、第 3 項はクーロン摩擦力、第 4 項はトルク定数の変動による電動機のトルクリプル、第 5 項はフレキシブルジョイントのねじれによる反作用力を表している。

電機子電流とモータの回転速度が検出可能であれば、(1) 式で定義した \$T_{dis}\$ は推定可能である。最小次元の外乱オブザーバを図 2 の斜線部に示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここで、\$g_m\$ は速度信号に含まれる雑音の影響を低減するための低減フィルタの遮断周波数である。また、図 2 では微分演算子 \$s\$ が表記されているが、実際には

斜線で囲まれた部分を部分分数展開を行い、微分演算子を用いずに図2のシステムを構成している⁽⁵⁾。推定される外乱トルクは(2)式で表される。

$$\hat{T}_{dism} = \frac{g_m}{s + g_m} T_{dism} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 T_{dism} は(3)式に示すように(1)式の I_a^{ref} を I_a に置き換えたものである。

$$T_{dism} = (J_m - J_{mn})s^2\theta_m + D_{ms}\dot{\theta}_m + T_f + (K_{tn} - K_t)I_a + k(\theta_m - \theta_a) \dots \dots \dots (3)$$

この図2で推定される $\hat{T}_{dism}$ をフィードバックゲイン $\alpha=1$ でフィードバックすることで、 T_{dism} に対してロバストな制御系を構成することが可能である。図2は何ら近似を施すことなく図3のように等価変換することができる。図3において、 G_1^* は T_{dism} からシステムまでの伝達関数であり、遮断周波数 $g_m K_t / K_{tn}$ をもつ高域フィルタである。理想的には $g_m \rightarrow \infty$ とすることで、 T_{dism} の影響を完全に除去できるが、ロバスト安定性の問題から $g_m \rightarrow \infty$ とすることはできず、その選択にはあるトレードオフが存在する。しかし、ロボットの動的周波数帯域を覆うように g_m を十分大きな値とすることで、 T_{dism} の影響はほぼ除去される。更に、 $G_1^* = K_{tn} / J_{mn}$ とすることでモータの加速度を指令入力とするモータ軸の加速度コントローラを実現で

きる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

このコントローラの特徴はモータ側とフレキシブルジョイント側が分離される点にある。しかしながら、フレキシブルジョイント側の共振根を制御することはできず、システムの安定性を向上させるためには<2・3>節で取上げる状態フィードバックが必要である。

<2・2> 外乱オブザーバとシステムの安定性

前節で述べたように、フレキシブルジョイントの制御に外乱オブザーバを適用した場合、システムの安定性が問題となる。本節では例題を通してこの問題を検討した。

外乱オブザーバを用いた位置制御系を図4に示す。このシステムはモータ側の状態量(位置、速度)のみをフィードバックし、フレキシブルジョイントの状態量はフィードバックされていない。この図で、 K_p は位置フィードバックゲイン、 K_v は速度フィードバックゲインである。

このシステムに対する安定性をラウスの安定判別法により調べてみる。表1がラウスの安定判別表であり、 $g_m \rightarrow \infty$ であると仮定している。これよりシステムの安定条件は次式となる。

$$\alpha < 1 \dots \dots \dots (4)$$

この式は、オブザーバのフィードバックゲイン α が1

図4 外乱オブザーバを用いた位置制御系
Fig. 4. Position controller based on the disturbance observer.

表1 図4のシステムにおけるラウスの安定判別表
Table 1. Routh table of the system as shown in Fig. 4.

$J_m J_a$	$k\{(1-\alpha)J_a + J_m\} + K_p G_1^* K_t J_a$	$K_p G_1^* K_t k$
$J_a K_v G_1^* K_t$	$K_v G_1^* K_t k$	
$k\{(1-\alpha)J_a + J_m\} + K_p G_1^* K_t J_a - J_m k$	$K_p G_1^* K_t k$	
$K_v G_1^* K_t k - \frac{J_a K_v G_1^* K_t K_p G_1^* K_t k}{\{K_p G_1^* K_t + k(1-\alpha)\}J_a}$		

のとき、このシステムは安定ではないことを意味している。

この問題は、図3からも説明することができる。フレキシブルジョイントのねじれの反力は T_{disa} に含まれるため、外乱オブザーバはこのねじれの反力まで補償してしまう。その結果、モータ側とフレキシブルジョイント側は分離される。この分離された状態においてモータ側の状態量をフィードバックしただけでは、モータ側を安定にすることはできるが、フレキシブルジョイント側を安定にすることはできない。すなわち、(4)式に示すように α が1のとき、システム全体としては安定ではないことになる。

そこで、外乱オブザーバを用いたシステムを安定にするためには、フレキシブルジョイント側の極を再配置しなくてはならない。そのためには、フレキシブルジョイント側の状態量をフィードバックする必要がある、〈2・3〉節で取上げる。

〈2・3〉 フレキシブルジョイントの防振制御

上述したように、システムの安定性を向上させるためには、フレキシブルジョイント側の状態量をフィードバックする必要がある。フレキシブルジョイント側の状態量として従来からアームの位置、速度、加速度が選ばれており、直接検出あるいは推定がなされてきた。本節では、まず最初にフレキシブルジョイントに

作用する外乱トルクを算出するアルゴリズムを示し、この外乱トルクをフィードバックすることにより実現される高精度な振動抑制制御法を提案する。

外乱オブザーバにより補償されたフレキシブルジョイントのシステムを図3に示す。ここで、 k はばね係数である。弾性体は三次元でありかつ厳密には非線形であるので、この k は一定値ではない。アームの自己慣性モーメント J_a はロボットの姿勢により変化する。この変化は自己慣性変動と共振周波数の変化をもたらす。負荷トルク T_{int} はコリオリ力、遠心力、重力の総和で、本論文では自己慣性変動力を含まない。また、振動を抑制するためにはフレキシブルジョイント側に電氣的ダンピング要素 D_{an} が挿入されなくてはならない。よって、上記要素の総和をフレキシブルジョイントに作用する外乱トルク T_{disa} と定義し次式で表す。

$$T_{disa} \equiv T_{int} + (J_a - J_{an})s^2\theta_a - D_{an}s\theta_a + (k_n - k)\left(\frac{\dot{\omega}_a^{cmd}}{s^2} - \theta_a\right) \quad (5)$$

ここで、 $\dot{\omega}_a^{cmd}$ はモータ軸の加速度コントローラへ入力する指令値である。

この(5)式で定義した外乱トルクはアームの加速度、速度、位置、およびモータの位置から直接算出され、そのアルゴリズムを図5の斜線部に示す。ただ

図5 状態フィードバックによるフレキシブルジョイント側の補償
Fig. 5. The compensated mechanical portion by the state feedback.

図6 図5の等価図
Fig. 6. Equivalent performance of Fig. 5.

し、この図では T_{disa} ではなく、 $\dot{T}_{disa}$ を算出している。 $\dot{T}_{disa}$ は(6)式に示すように(5)式の $\dot{\omega}_a^{cmd}/s^2$ を θ_m に置き換えたものである。

$$\begin{aligned} T_{disa}' = & T_{int} + (J_a - J_{an})s^2\theta_a - D_{an}s\theta_a \\ & + (k_n - k)(\theta_m - \theta_a) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

フレキシブルジョイントに作用する外乱は、この T_{disa} をモータ側の逆システムを通してフィードバックすることにより抑圧することができる(図6)。ここでモータ側の逆システムは、外乱オブザーバにより加速度コントローラが実現されているため、直列微分要素 s^2 で表すことができる。図5の等価図が図6である。

図6において、フレキシブルジョイント側は、ノミナルな慣性モーメント J_{an} 、ノミナルな粘性定数 D_{an} 、ノミナルなばね定数 k_n に固定化され、 T_{disa} は除去されている。ノミナル値はオブザーバで定めているので、これらの値を任意に設定することが可能である。特に D_{an} はシステムの安定性に効果的である。

しかしながら図5を構成するにあたり、高精度の加速度センサは存在しない。本論文ではアームの位置が検出可能であるとし、加速度信号はこの位置信号を2回微分することにより求めている。図7が $\dot{T}_{disa}$ を推

定する最小次元アルゴリズムで、外乱オブザーバにより補償されたモータ側の逆システムも含んでいる。ここで、図7では微分演算子 s および直列微分演算子 s^2 が表記されているが、図2のシステムと同様に実際には、斜線で囲まれた部分を部分分数展開を行い、これらの微分演算子を用いずに図7のシステムを構成している⁽⁵⁾。このアルゴリズムは $\dot{T}_{disa}$ を4次遅れで推定し、その遅れ要素は g_{a1} , g_{a2} , g_{a3} , g_{a4} である。 $\dot{T}_{disa}$ の推定値は(7)式である。

$$\begin{aligned} \hat{\dot{T}}_{disa} = & \frac{g_{a4}}{s^4 + g_{a1}s^3 + g_{a2}s^2 + g_{a3}s + g_{a4}} T_{disa} \\ & \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

前述と同様、図7に示すようにこの $\hat{\dot{T}}_{disa}$ をフィードバックすることで、 T_{disa} に対してロバストな制御系を構成することが可能である。図7は何ら近似を施すことなく図8のように等価変換することができる。同図において、 G_3^* は T_{disa} からシステムまでの伝達関数であり、(8)式に示されるような高域フィルタである。

$$G_3^* = \frac{s^4 + g_{a1}s^3 + g_{a2}s^2 + g_{a3}s}{s^4 + g_{a1}s^3 + g_{a2}s^2 + g_{a3}s + \frac{k}{k_n}g_{a4}} \dots (8)$$

理想的には $g_{a1} \sim g_{a4}$ をできるだけ十分大きな値とす

図7 状態フィードバックによる振動抑制
Fig. 7. State feedback for suppressing vibration.

図8 図7の等価図
Fig. 8. Equivalent performance of Fig. 7.

図 9 フレキシブルジョイントの位置制御
Fig. 9. Position controller of flexible joint.

図 10 図 9 の等価図
Fig. 10. Equivalent performance of Fig. 9.

ることで T_{disa} の影響を除去できるが、 G_2^* と同様、これらの選択にはあるトレードオフが存在する。しかし、ロボットの動的周波数帯域を覆うように $g_{a1} \sim g_{a4}$ を大きな値にすることで、 T_{disa} の影響はほぼ除去できる。

3. 位置制御

前章で述べたように、外乱オブザーバを適用すると、モータ側とフレキシブルジョイント側は分離される。本論文ではこの点を活用し、モータの位置をフィードバックすることにより制御系の設計が容易となる位置制御法を提案する。

図 9 が提案する制御系であり、位置制御の安定性を確保するためにモータの速度をフィードバックしている。 K_p は位置偏差ゲイン、 K_v は速度偏差ゲインである。また、振動抑制の補償信号は(9)式で与えている。

$$\dot{\omega}_{acmp} = \left(\frac{K_p}{s^2} + \frac{K_v}{s} + 1 \right) \frac{1}{k_n} \ddot{T}_{disa} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ブロック線図の等価変換により図 9 は図 10 となる。同図より、提案する制御系は位置制御系と振動抑制系

図 11 実験に用いられたフレキシブルジョイントロボット
Fig. 11. Tested robot with flexible joint.

御系が分離された制御系と言える。また、各制御系は二次系であるため任意に極を配置することが可能であり、制御系の設計が容易であることがわかる。

4. 実験結果

提案する制御系の有効性を確認するため実験を行っ

図 12 実験システムのシグナルフロー
Fig. 12. Signal flow diagram of experimental system.

図 13 実験結果 (ステップ応答)
Fig. 13. Experimental result of unit step response.

た。図 11 が実験に用いた 1 自由度のフレキシブルジョイントロボットで、実験システムのシグナルフローを図 12 に示す。外乱オブザーバおよび振動抑制の補償信号の計算は DSP (Digital Signal Processor: μ PD77230) 上で行い、サンプリング時間は 1 ms となっている。ステップ応答の実験結果を図 13 に示す。補償を行わないときと比べ、提案する制御系では振動が抑制されている。

5. む す び

本論文は、外乱オブザーバと状態フィードバックを用いた高精度なフレキシブルジョイントの振動抑制制御法を提案した。外乱オブザーバはモータ軸の加速度コントローラを実現し、状態フィードバックにより振動を抑制している。モータ軸の加速度コントローラは状態フィードバックを効果的に行うために必要不可欠である。本手法の有効性は 1 自由度のフレキシブルジョイントロボットを用いた実験で示されている。

(平成 2 年 3 月 26 日受付, 同 2 年 9 月 3 日再受付)

文 献

- (1) C. C. De Wit, et al.: "Robust Control and Parameter Estimation of Robots with Flexible Joints" Proc. IEEE Int. Conference. Robotics and Automation, vol. 1, 324 (1988)
- (2) G. R. Widmann, et al.: "Control of Industrial Robots with Flexible Joints", *ibid.*, vol. 3, 1561 (1987)

- (3) M. W. Spong, et al.: "Adaptive Control of Flexible Joint Manipulators", *ibid.*, vol. 2, 1188 (1989)
- (4) M. Nakao, et al.: "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation", *ibid.*, vol. 1, 326 (1987)
- (5) K. Ohnishi, et al.: "Applications of Advanced Control Techniques in Electrical Drives", Proc. Int. Workshop. Microcomputer Control of Electric Drives, AI. 1-24, Trieste, Italy (1989)
- (6) 金子, 他: 「フレキシブルジョイントの防振制御」, 電気学会産業電力電気応用研資, IEA-89-19 (平成)
- (7) K. Kaneko, et al.: "A Drive Control of Flexible Joint", International Power Electronics Conference Tokyo, Vol. 1, 442 (1990)

金子 健二 (正員)

昭和 40 年 9 月 22 日生。平成 2 年 3 月慶応義塾大学理工学部電気工学科修士課程修了。同年 4 月通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。

大西 公平 (正員)

昭和 27 年 7 月 25 日生。55 年東京大学大学院博士課程修了。工学博士。現在、慶応義塾大学理工学部電気工学科助教授。