能動的除振装置への4軸完全な非干渉化制御の適用

正 員 涌 井 伸 二 (キャノン)

Application of Complete Decoupling Control for an Active Vibration Isolation System with 4-Degree-of-Freedom

Shinji Wakui, Member (Canon Inc.)

キーワード：能動的除振装置，空気ばね，非干渉化制御，運動モード

1. はじめに

除振台に搭載された精密位置決め装置の性能を極限まで追求していくと，より積極的に床振動の影響を除去し，かつ同装置自身が発生する振動を抑制する必要性が生じる⁽¹⁾⁽²⁾。このため，受動的除振装置に代わり除振・制振間のトレードオフが解消できる能動的除振装置を導入する傾向がみられる。この場合，多軸制御となるが，従来から1軸ごとの独立制御ループを備えることが普通である。ゆえに，軸間干渉により制御系のパラメータ調整が煩雑となり高価な除振装置の性能を十分引き出し得なかった。そこで，本レターでは空気ばねを用いた能動的除振装置を対象に，運動モードに基づいて位置のみならず機構安定化の加速度ループも取り込んだ4軸完全な非干渉制御系を提案する。

2. 空気圧制御による能動的除振

図1に鉛直方向に対する4軸完全な非干渉化制御系を採用した能動的除振装置を示す。1m四方の除振台4隅には，空気ばねをアクチュエータとし，位置と加速度センサを備えた支持脚が配置される。支持質量は約190 kgである。従来の4軸独立制御系では，加速度と位置ループとからなる制御系を支持脚ごとに独立に備える。ここで，支持脚1軸で考えたとき電圧電流変換器（図中，VI変換と略記）への入力電圧 v_c からサーボバルブを通り空気ばねを駆動して変位 z を発生するところまでの伝達関数は，質量 m ，ばね定数 k ，粘性摩擦係数 c ，ゲイン k_i において

$$\frac{z}{v_c} = \frac{k_i}{s(ms^2 + cs + k)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1 4軸完全な非干渉化制御系の構成図

Fig.1. Schematic diagram of complete decoupling control system with 4-degree-of-freedom.

図 2 運動モードの種類
Fig. 2. Classification of motional mode.

となる。従って、VI 変換器前段への加速度ゲイン k_s のフィードバックによって、等価粘性摩擦係数は $c + k_s k_s$ となる。つまり、加速度ループは支持脚の機械共振に対する安定化作用をもつ。

3. 4 軸完全な非干渉化制御の適用効果

運動モードに基づいた位置と加速度に対する 4 軸完全な非干渉化制御系は、4 軸独立制御系の中に運動モード抽出と運動モード分配回路を挿入することによって実現される。いま、鉛直方向の変位 z を平衡面から定めて $z_1 \sim z_4$ とおく。図 2 を参照して、上下動の並進、 x 軸回りの回転、 y 軸回りの回転、およびねじりの運動モード偏差信号を $z_g, z\theta_x, z\theta_y, z\theta_\phi$ と定義する。従って、運動モード抽出回路は次式で与えられる^(a)。

$$\begin{bmatrix} z_g \\ z\theta_x \\ z\theta_y \\ z\theta_\phi \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

上記の運動モード偏差信号は PI 補償器に導かれ、その出力と各支持脚の加速度信号を入力とした運動モード抽出回路の負帰還信号を加算して運動モード駆動信号 $c_g, c\theta_x, c\theta_y, c\theta_\phi$ となる。この信号は (2) 式の逆変換である運動モード分配回路を通り各軸 VI 変換器への駆動信号 $d_1 \sim d_4$ となる。ただし、加速度信号の入力に対する運動モード抽出回路の演算も (2) 式に従う。

さて、図 3 は VI 変換器前段に加算端子を設けてステップ状のねじり外乱を印加したときの運動モード偏差信号である。比較のため、4 軸独立制御系における位置の目標値や制御パラメータをいっさい変更せずに運動モード抽出・分配回路を挿入して非干渉化してい

(a) 4 軸独立制御 (b) 4 軸非干渉化制御
図 3 ねじり外乱印加時の運動モード偏差信号
Fig. 3. Error signals for torsional disturbance.

る。同図より、非干渉化制御系では励起した運動モードとともにそれ以外の偏差信号が抑圧されていることがわかる。また、非干渉化により加速度ループのダンピングや位置ループの姿勢調整が従来に比べて簡便に実施できることが確認できた。

なお、非干渉化制御系では 4 軸独立の制御パラメータをそのまま踏襲する必然性はない。むしろ、最適化のためには運動モードごとに適切な補償法をとらねばならないし、それが可能なループの骨格をもつ。

4. むすび

鉛直方向 4 軸の能動的除振装置に対し位置のみならず機構安定化用の加速度ループも運動モードに基づく非干渉化を行った結果、外乱特性の改善が図れることを示した。
(平成 5 年 7 月 6 日受付)

文 献

- (1) 岩田・大塩, 他: 「精密除振装置のアクティブコントロール」, 機械学論 C, 57, No. 534 (平 3-2)
- (2) 安田・大坂, 他: 「フィードフォワード制御を併用したアクティブ除振装置の研究」, 同上 C, 58, No. 552 (平 4-8)
- (3) 大西・正田・山村: 「吸引形磁気浮上車の非干渉モデル」, 計測自動制御学論, 17, No. 6 (昭 56-9)

涌井 伸二 (正員)

昭和 29 年 12 月 23 日生。54 年信州大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年第二精工舎入社。平成元年キャノン入社。現在、制御システム研究室室長。工学博士。ステッパの研究開発。