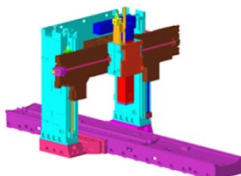


大形門形加工機 MVR の MBD 解析を適用した振動抑制技術

Vibration Suppression Technology Using MBD Analysis of Double-column Milling Machine MVR



金澤 宏幸*1
Hiroyuki Kanazawa

三品 俊二*2
Shunji Mishina

川内 章央*3
Kawauchi Akihisa

赤木 朋宏*4
Tomohiro Akaki

加藤 義樹*5
Kato Yoshiki

三菱重工業(株)(以下、当社)では、工作機械、民間航空機、新交通システム、風車など多数の部品で構成される製品において、構造部品の振動特性や機械要素部品の荷重伝達で構築される動力学解析(マルチボディダイナミクス:以下 MBD(Multi Body Dynamics))の適用を進めており、製品性能の事前予測による性能向上及びロバスト性向上に努めている。本報では、機械振動が製品性能に直結する大形門形加工機を対象に、MBD と制御モデルを組み合わせて、高精度な解析モデルを構築し、さらに MBD モデルを活用した振動抑制方法を開発したのでその概要を紹介する。

1. はじめに

当社では各種製品の開発効率化及び品質向上のために、多体系構造の振動特性や接触/摩擦といった機械要素を含んだ動力学解析(MBD)の適用を進めている。MBDとは、複数の機械要素で構成される部品、及び複数の部品で構成される製品(システム)を多体(マルチボディ)と定義した時、部品レベルから製品レベルの相互に連結された多体の動力学(Dynamics)を解析する数値解析技術を指す。MBDは、その導入当初、機構学による挙動評価や干渉問題を対象にしていたが、近年技術の進展により構造部品の弾性特性や機械要素部品の特性に加えて実機と同じ制御モデルと連携することでDigital空間における仮想試験により、性能や損傷リスクをばらつきまで含めて評価可能となってきている。

本報では、大形門形加工機を対象として加工時の機械振動を再現可能な MBD モデルを構築し、作成した MBD モデルから振動補償器を導出する新しい手法を開発した。また送り軸の加減速時に発生する微小な機械振動が加工品位を悪化させる金型加工において開発した振動補償器により面品位を向上する効果を得たので、以下に紹介する。

2. 加工時振動を再現可能な MBD モデルの構築

2.1 解決したい課題

従来、大形門形加工機的设计において、目標仕様に対する事前評価は加工反力に対する静剛性・動剛性の評価及び固有値解析に留まり、最終加工性能は加工試験により評価してきた。しかし実運用においては様々な加工パスと加減速パターンで運転するため、条件によっては想定外の振動が発生し、加工精度が評価基準を満足できない事象があり、都度調整に時間を要していた。また、加工精度を満足するために送り速度や加速度を低減することにより加工時間が長くなることもあった。

*1 総合研究所機械研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*2 三菱重工工作機械(株)技術本部機械制御設計課 主席チーム統括 技術士(電気電子部門)

*3 総合研究所振動研究部

*4 総合研究所機械研究部 主席研究員

*5 ICTソリューション本部CIS部 主席技師

このような課題に対して構造部品の振動特性が考慮されていない低次元化した制御系シミュレーションモデルや加工パスの加減速パターンを考慮しない線形周波数領域の振動解析では過渡的な振動発生要因を正確に把握できないために定速用パターンを加味した対策検討が不十分であった。

2.2 MBD 解析結果と実機挙動の比較による精度向上

上述した課題に対して、**図1**に示す実機構造に対して MBD モデルを構築し、**図2**に示す制御モデルを組み合わせることで実機運転パターンに対して振動評価が可能となった。本モデルには**図3**に示す構造解析モデルから取得した振動特性と門形加工機を構成する構造部品の形状、密度、ヤング率及び部品間を結合するボールねじなどの機械要素部品の剛性などの情報が含まれている。

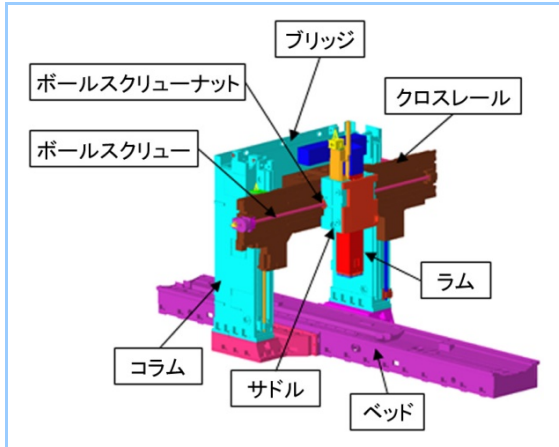


図1 大形門形加工機 MVR の構造

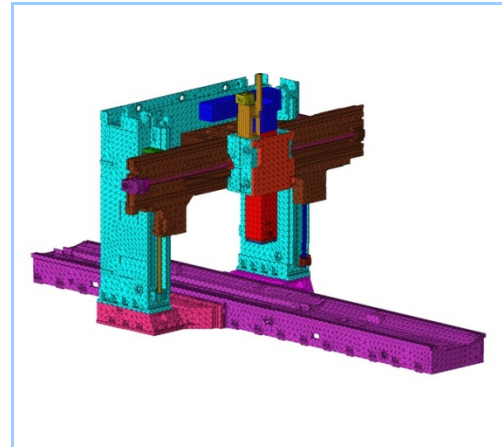


図3 構造解析モデル

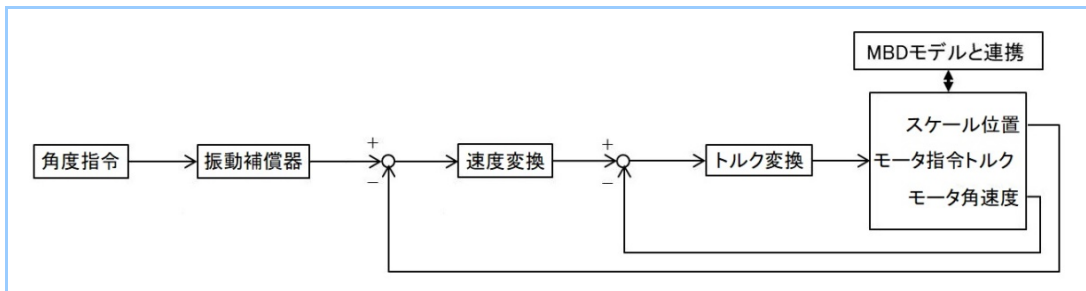


図2 制御モデル

図4に示すように、加工面品位に影響することが確認されている振動モードが表現できており、**図5**に示すように実機運転パターンに対して振動振幅 $10\mu\text{m}$ 単位の過渡的な応答も表現できていることを確認した。このように MBD 解析では従来の FEM 解析による振動特性に加え実機運転時の過渡的な応答を表現可能である。本モデルによるシミュレーション結果を実機の設計開発に反映することでより高精度な加工を実現する構造及び運転パターンの提案が可能となる。

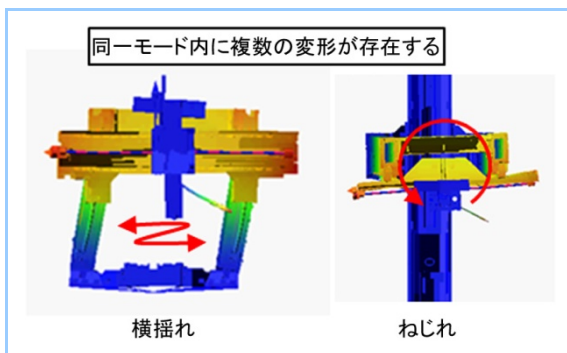


図4 振動モード予測結果例

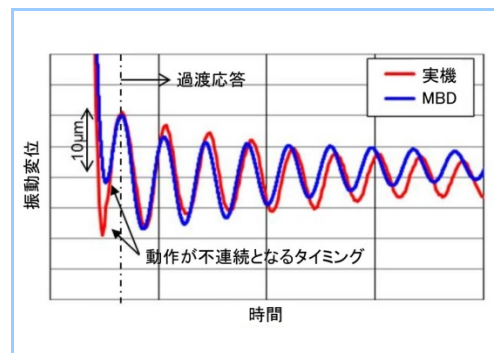


図5 実機とMBDの振動比較

3. MBD モデルを活用した振動補償器の導出

3.1 従来の振動補償器の課題

大形門形加工機実機の加工パスにおいて、水平移動から上下移動への変化など加速度が不連続となる運動を実施する際に加工品質の低下につながる過渡的な振動が発生する。この過渡的な振動を抑制する目的で補償器を用いる対策を行っている。ここで、従来の補償器設計では対象構造の振動特性を表現するために式(1)に示すような主要な構成要素の質量・慣性モーメントや部品剛性に基づく物理モデルにより補償器を設計していた。しかし、物理モデルによる設計では、姿勢、摩擦、ガタ等による非線形性を考慮できない。その結果実機検証時に誤差が生じるため、設計段階で、振動抑制効果を創りこむことに限界があった。

$$\theta_L = \theta \times \frac{(2 \times J_C \times S^2 + C_C \times S + K_C)}{\{(2 \times J_G - J_L) \times S^2 + (C_C - D_L) \times S + K_C\}} \quad \text{式 (1)}$$

θ : 機械先端位置, θ_L : リニアスケール位置

J_L : 負荷イナーシャ, J_C : コラムイナーシャ

D_L : 負荷粘性, K_C : コラム剛性, C_C : コラム減衰

3.2 新しい振動補償器の導出手法の提案

新しい補償器は実機挙動を表現できることを確認した MBD モデルを用い、振動抑制を狙う対象機構構造の周波数特性から得られる伝達関数から導出する。具体的には図6に示す MBD モデルによるシミュレーションで得られた周波数特性から特徴点を抽出し、これを用いて式(2)に示す2次の伝達関数を直接導出する。その結果を用いて補償器を導出する。

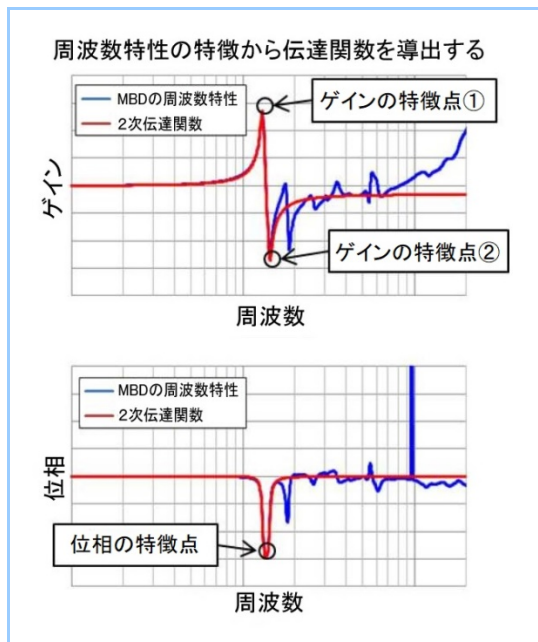


図6 2次伝達関数の推定導出

$$G_m(S) = \frac{\frac{1}{\omega_2^2} s^2 + \frac{2\zeta_2}{\omega_2} s + 1}{\frac{1}{\omega_1^2} s^2 + \frac{2\zeta_1}{\omega_1} s + 1} \quad \text{式 (2)}$$

ω_1 : ゲインの特徴点①の周波数, ζ_1 : ゲインの特徴点①の減衰率

ω_2 : ゲインの特徴点②の周波数, ζ_2 : ゲインの特徴点②の減衰率

3.3 開発した手法の効果確認結果

前述した MBD モデルを活用した振動補償器の効果を実機の金形加工で確認したところ、図7及び図8に示す通り、従来の補償器と比較して振動抑制効果があり、加工面品位も向上していることが認められた。

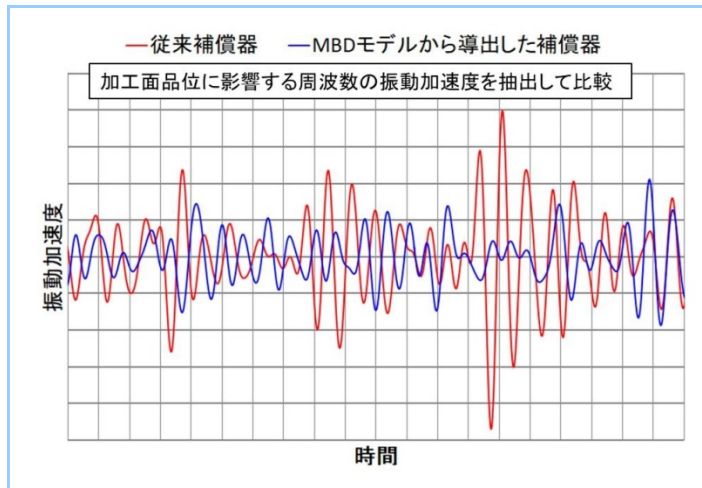


図7 実加工時のコラム振動加速度の比較

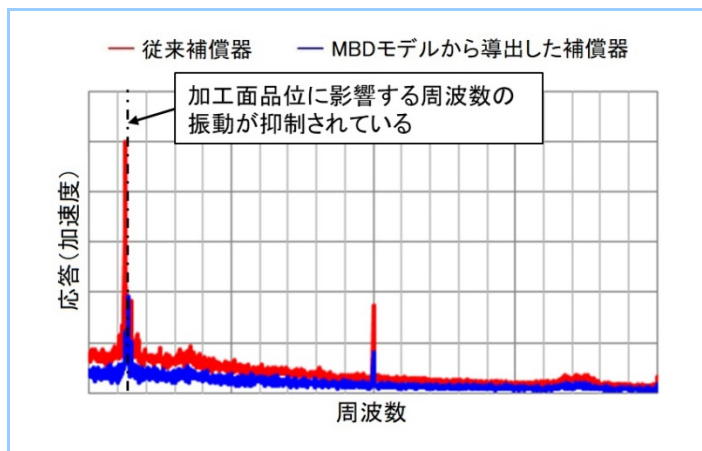


図8 実加工時のコラム振動加速度の周波数分析結果

4. まとめ

本報では大形門形加工機を対象として MBD 解析モデルと実機制御モデルを組み合わせ、全体システムをシミュレーションできることを示し、そのモデルから実機性能の向上及び価値向上につながる振動補償器の導出が可能であることを示した。

今回示したようなモデルベースの検討を可能とすることで機械構造の改良検討や制御を含む全体システムの最適化が迅速かつ高精度に進められると考える。

今後も製品開発における開発期間の短縮や設計段階での適用による製品性能向上及びロバスト性向上に活用していく。

参考文献

- (1) 久良賢二ほか, 加工面段差 $10\ \mu\text{m}$ 以下の高精度加工を実現する門形機 MVR-E χ での最新技術, 三菱重工技報, Vol.52 No.1 (2015) p.99~102
- (2) 金澤宏幸ほか, 大規模マルチボディダイナミクスによる機械挙動の高精度予測, 三菱重工技報 Vol.52 No.4 (2015) p.100~103