

モデルベース開発を活用した工作機械の機構-制御設計プロセス革新

金谷茂之*
Shigeyuki Kanaya
外池恵大*
Keita Tonoike
藤田智哉†
Tomoya Fujita

魚住誠二‡
Seiji Uozumi
國 拓也§
Takuya Kuni
磯田洋平||
Yohei Isoda

Mechanical & Control Design Process Innovation for Machine Tools with Model Base Development

*設計システム技術センター
†先端技術総合研究所(博士(工学))
‡同研究所
§名古屋製作所
||コミュニケーション・ネットワーク製作所

要 旨

工作機械などのメカトロニクス製品開発で、加工品質及び生産性(以下“加工性能”という。)の向上が求められている。加工性能の向上には、高速動作と精密な位置決めが両立が必要になる。従来の開発プロセスでは、代表的な性能である加工精度に対して、機械の変形や振動、摩擦が与える影響を予測することは難しく、試作・改良の繰り返して完成度を高める必要があり、開発が長期化していた。課題である開発期間を削減するため、弾性体機構と制御の連成解析モデルを構築した。工作機械を模擬した簡易検証装置の連成解析モデルを活用し、加工動作のシミュレーションと実験の結果を比較した。その結果、連成解析モデルが簡易検証装置の動作を再現可能なことを確認した。

1. ま え が き

モデルベース開発(MBD: Model Base Development)、モデルベースシステム開発(MBSE: Model Based Systems Engineering)とは、一般にシミュレーションモデルに限らず、文書や図面に記載がない抽象化した要求や機能を表現したツリーやブロック図を共通言語として、段階的に詳細化・具体化して事前評価を進める開発のことを指す。本稿でのMBDは特に、1D-CAEや3D-CAEを用いた事前評価を取り入れた開発と定義する。

一般的な開発プロセスでは、開発上流の企画段階で目標性能の検討や仕様分析が不十分な場合や、仕様から機能/要素への分解、紐(ひも)づけが曖昧な場合、開発下流の評価検証段階で手戻りが発生するといった課題がある。また、開発下流では、部位・技術分野別で詳細を設計するため部分最適になり全体最適化が難しいことや、製品システム全体の目標性能達成の目途出しが試作によってだけ確認可能といった課題がある。

各開発プロセスで求められるシミュレーションモデルは、開発上流ではシステム構想モデルとして1D-CAE、開発下流では製品性能確認モデルとして3D-CAEが用いられることが多い。MBDを成功させるには、各開発プロセスでボトルネックになっている工程を抽出して、その原因を分析し、適切なシミュレーションモデル化によってあるべき開発プロセスを構築する必要がある。本稿では、レーザー加工機に代表される工作機械を題材として、図1に示す従来の開発プロセスから、連成解析を活用したMBD開発プロセスを検討する。

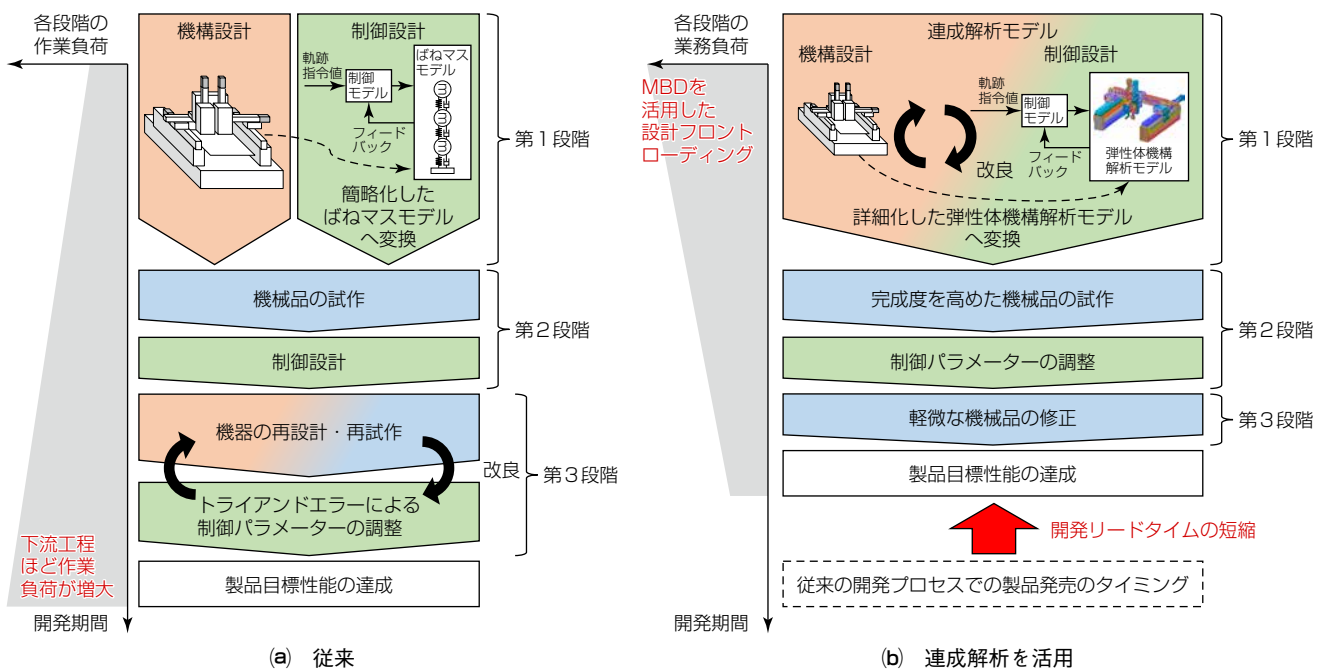
2. 従来の工作機械開発プロセスと問題

近年、レーザー加工機を始めとする工作機械で、ユーザー工場での品質と生産性を確保するために、加工性能の向上が求められている。例えば、工作機械に要求される代表的な性能として、高速化、高加減速化、省エネルギー化、低コスト化が挙げられる。生産性向上のために、高速化及び高加減速化すると、励振される振動成分の増大や摩擦影響の顕在化によって加工品質が低下する場合がある。また、省エネルギー化や低コスト化のために使用する材料を削減すると、固有振動数などの振動特性が悪化する場合がある。そのため精密な位置決めと高速動作等の加工性能向上と材料コストを適正に両立させる機器設計技術が必要である。

従来の工作機械の開発では、図1の従来の工作機械開発プロセスに示すように、試作機を複数回試作・改良しながら性能を作り込んでいた。従来の工作機械の開発プロセスは、大きく分けて3段階の開発フェーズになっている。開発上流の第1段階では、構造と制御の設計者が構造体を質点とばねに置き換えたばねマスモデルで情報を共有するが、連携度が低い開発プロセスになっていた。第2段階で機械を試作し制御と組み合わせで性能を検証し、第3段階で制御の調整と機械改良を繰り返すことで製品性能を作り込んでいた。そのため、実験による制御調整と機械改良に基づく目標性能達成には時間を要して、開発期間が長期化し、開発コストが増大してしまう。また、開発下流での構造の改良では、設計自由度に

制約があり、部分的な改良しかできず、大幅な性能改善の達成は困難であった。これらに示すとおり、工作機械の開発プロセスで、リードタイム短縮のためには、開発下流の試作による製品性能検証に代わるシミュレーションモデルを構築し、開発上流の設計段階で、構造と制御の設計結果を密に擦り合わせる事が可能になるモデルの構築や、開発プロセス協調化が課題であった。これまで、CAE(Computer Aided Engineering)ソフトウェアを用いて構築した3D機械構造と制御のモデルを連成したモデルベースシミュレーターは提案されている⁽¹⁾が、解析時間及び精度については言及されていない。また、有限要素モデルを活用した低次元モデルと制御系を連成し、振動を抑制する手法は提案されている⁽²⁾が、姿勢変化などの機構動作に対しては言及されていない。

本稿では、図1の連成解析を活用した工作機械の開発プロセスの実現を目指して、“3D-CAEによる弾性体機構解析モデル”と“数値解析シミュレーターによる制御モデル”を連成した解析手法を構築し、その解析時間と工作機械の性能予測精度を述べる。



3. 工作機械の加工精度予測手法

3.1 弾性体機構解析モデル概略

図2は今回対象とした小型工作機械の弾性体機構解析モデルである。表1にこの工作機械の仕様を示す。機構解析モデルは、機構解析ソフトウェアを用いて構築した。対象とした小型工作機械は、ボールねじ駆動のガントリー構造の小型実験機で、加工用の主軸の代わりに、XY平面内の工具-工作物相対変位を測定するための、グリッドエンコーダーを取り付けている。弾性体機構解析モデルは、設計時に作成した3D-CADモデルをベースに、密度などの物性値を付与することで、各部品の質量、慣性モーメント、重心を算出している。ボールねじ駆動部分のトルク伝達については、マルチボディーモデルで再現している。また、振動モードをより正確に模擬するため、一部の部品を弾性体化し構築している。図3は図2に示す弾性体機構解析モデル内の弾性体化した部品を示す図である。

3.2 連成解析モデル概略

図4に今回構築した連成解析モデルの概略図を示す。図4に示すとおり、数値解析シミュレーターによる制御モデルと機構解析ソフトウェアによる弾性体機構解析モデルが時刻歴に情報をやり取りする。まず、連成解析モデルにヘッド軌跡

の指令値をインプットし、制御ロジックに基づくモータトルク情報を計算する。計算したトルク情報は数値解析シミュレータ内のインターフェースから機構解析ソフトウェアの弾性体機構解析モデルへ受け渡して、ヘッドやモーターの位置及び速度を制御モデルに返す。これらの処理が時刻歴にループすることで、実機でのフィードバック制御をモデルベースで再現する。制御モデルからはヘッド軌跡などの時刻歴情報を出力し、弾性体機構解析モデルからは弾性変形による変位や応力の解析結果を出力する。ヘッド軌跡からは加工速度などに対応した加工精度が、弾性変形などの結果からは疲労強度の検証などが可能になり、設計段階での工作機械の性能評価が可能になる。

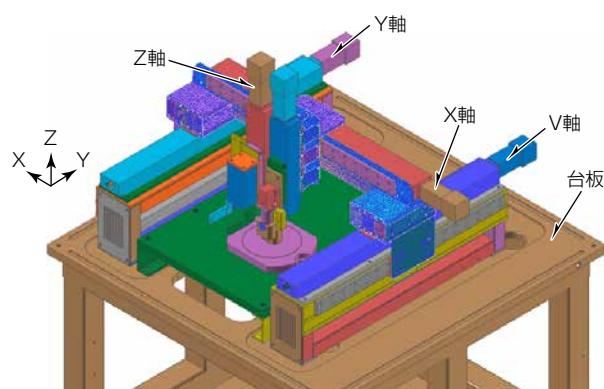


図2-弾性体機構解析モデルの概略図

表1-工作機械の仕様	
動作する質量(kg)	Y-V: 41, X: 13, Z: 1
駆動方式(pitch 6mm)	ボールねじ
動作範囲(mm)	X, Y: 300, Z: 100
最大速度(mm/min)	30,000
最大加速度(G)	1.5

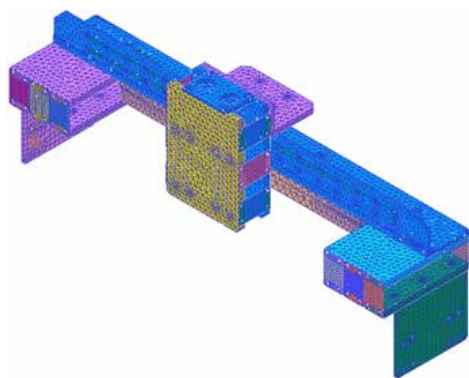


図3-機構解析モデル内の弾性体化領域

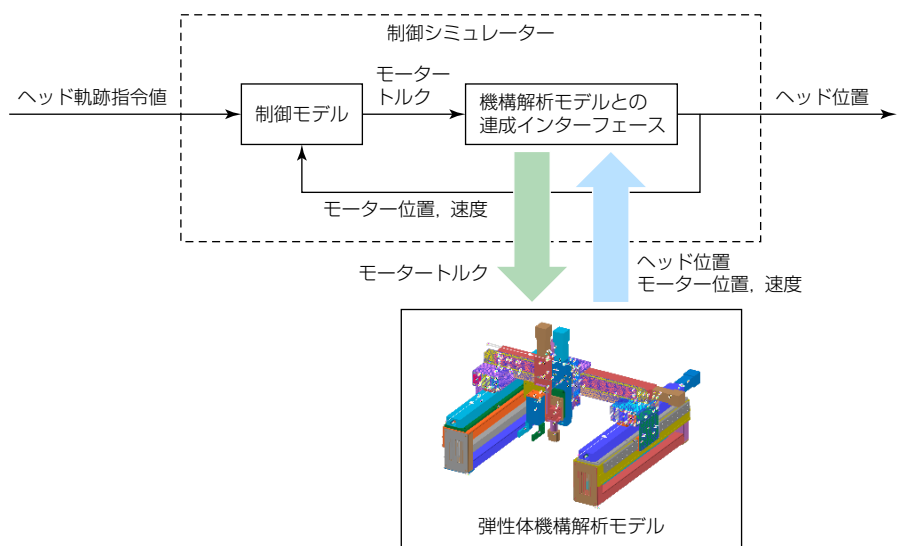


図4-連成解析モデルの概略図

4. 連成解析での実機挙動の再現性確認

今回構築した連成解析モデルの再現性を確認する。再現性の確認では、図5に示す四角を描く角軌道の精度を比較する。角軌道の再現性確認では、軌道が直角に曲がった際のオーバーシュートと呼ばれる突起がポイントになる⁽³⁾。図6に連成解析モデルによる角軌道の解析結果を示す。突起のオーバーシュート、その後の振動の減衰挙動になっている残留振動を比較した結果、実験データと連成解析結果でよく一致することを確認した。これらのデータから、今回構築した弾性体機構解析モデルと制御モデルの連成解析手法は、今後のモデルベースでの加工性能予測に利用可能なことを確認した。

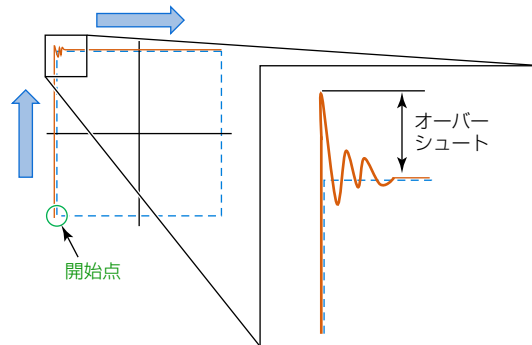


図5-四角を描く角軌道

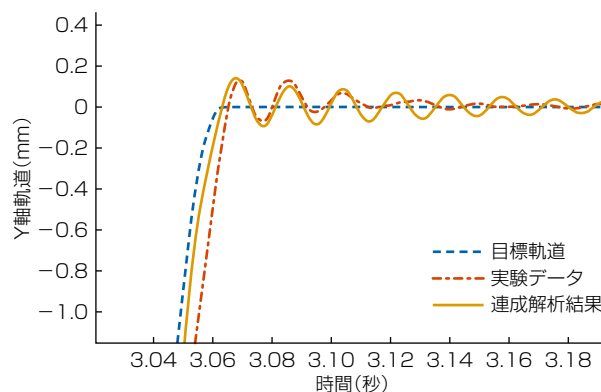


図6-連成解析結果と実験データの比較

5. 検討する工作機械の開発プロセス

構築したコンパクトな連成解析モデルを用いたフロントローディング型の工作機械の開発プロセスでは、弾性体機構と制御の連成解析モデルを開発上流の第1段階に適用し、ヘッド軌跡などの加工性能を確認する。連成解析モデルから得られた結果情報から、機械と制御の設計パラメーターを相互に協調検討することで、従来は第3段階の試作による目標性能の作り込みを試作前の設計段階で可能にする。今回の新開発プロセス構築によって、従来プロセスの開発長期化の要因になっていた第3段階の試作の繰り返しによる性能作り込み回数を抑制し、開発期間の短縮と製品の高性能化が実現可能になる。

また、参考文献(1)によって提案されているとおり、連成解析モデルと最適化技術を組み合わせることで、制御パラメーターの最適化が可能になり、図7に示す制御パラメーター最適化によって、オーバーシュートを低減することが可能になる。これらを設計段階で適用する手法として、図8に示す連成解析モデルへ最適化モジュールを組み合わせることで、制御及び構造パラメーターの最適化が可能になる。これによって、設計者の構造と制御の設計結果を擦り合わせる検討時間を削減し、より創造性の高い業務時間を確保できる。

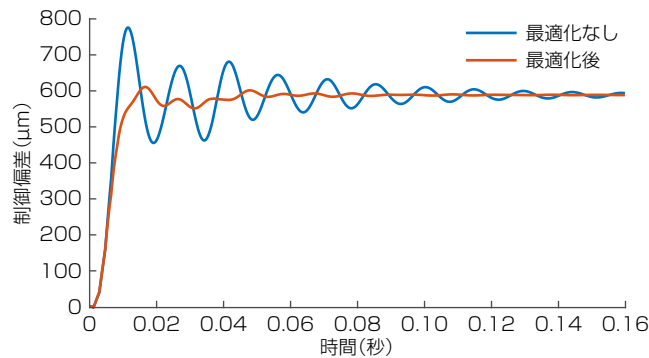


図7-制御パラメーター最適化によるオーバーシュートの抑制

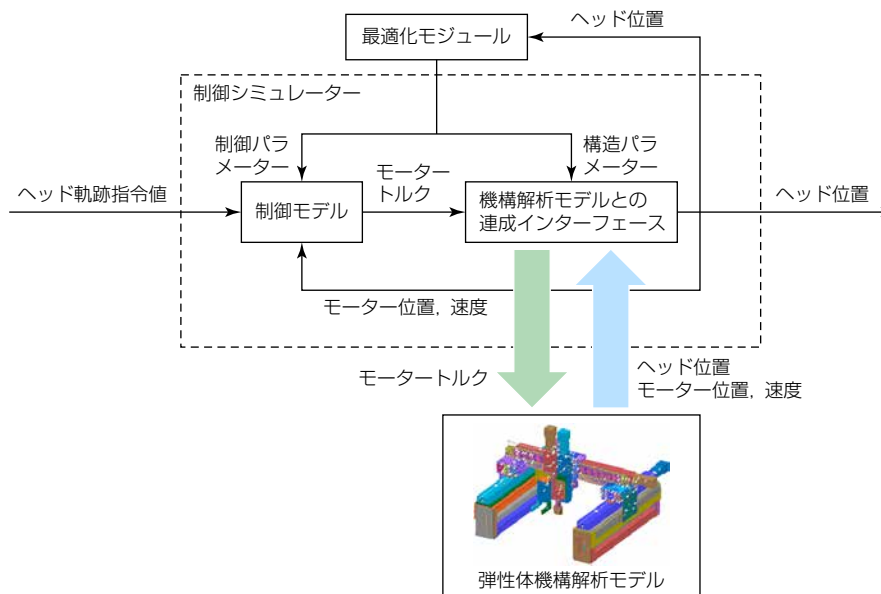


図8-最適化モジュールと組み合わせた連成解析モデル

6. む す び

今回検討した内容を次にまとめる。

- (1) 工作機械の開発期間短縮を目的に、“3D-CAEによる弾性体機構解析モデル”と“数値解析シミュレーターによる制御モデル”を連成した解析手法を構築し、実験データと比較した。
- (2) 連成解析モデルで解析が実験の結果がよく一致することを確認し、モデルベースでの工作機械の性能予測が可能であることを示した。
- (3) 連成解析モデルを用い、図1に示す設計上流段階での性能作り込みによる試作回数の低減と開発期間の短縮を実現する工作機械のモデルベース開発プロセスを考案した。
- (4) 構築した連成解析モデルと最適化技術を組み合わせて、制御と構造のパラメーターを最適化することで、設計結果を擦り合わせる検討時間を削減し、より創造性の高い業務時間を確保する。

参 考 文 献

- (1) 藤田智哉, ほか: Model-Based Designを用いた工作機械の設計・制御最適化手法の開発(第一報), 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 542~543 (2022)
- (2) 小野仁章, ほか: スマート構造の複合領域最適化による振動・騒音の抑制, Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM論文集, No.05-15 (2005)
- (3) 松原 厚: 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版 (2008)