

工作機械駆動系と切削力の時間領域連成シミュレーション

神戸大学 ○野口晋, 枝川祐希, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

要旨

切削力は送り駆動系や主軸駆動系に外乱として作用し、送り速度や主軸回転数に変動する要因となる。その変動で切り込み量や切削速度が変動して切削力も変化する。本研究では、主軸駆動系および送り駆動系の運動と切削力の連成シミュレーションを行うための方法を開発した。実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、切削力により駆動系に生じる振動とそれによる切削力の変化を的確に表現できることを確認した。

1. 諸言

数値制御工作機械による加工においては、その効率と精度とが大変重要であり、そのためには、切削加工シミュレーションによって、加工中の切削状態の推移を事前に予測し、切削条件や工具経路の最適化にその情報を活用することが有効である。

これまでに、送り駆動系の運動誤差が加工面に及ぼす影響の研究や、工作機械の消費エネルギーに及ぼす工具切れ刃通過周波数の影響の研究において、工作機械の送りおよび主軸駆動系の運動特性が考慮された¹⁾²⁾。また、エンドミル加工における加工精度の予測に関する研究の中で、加工中の切削力がシミュレーションされた³⁾。しかし、これらの研究においては、切削力が駆動系の運動に及ぼす影響については考慮されてこなかった。

数値制御工作機械では、切削力は送り駆動系や主軸駆動系に外乱として作用し、送り速度や主軸回転数に変動する要因となる。さらにその変動により切り込み量や切削速度が変動して切削力も変化するため、加工現象のより正確なシミュレーションのためには、駆動系の特性と切削力との関係を考慮する必要がある。

そこで本研究では、実際のNC工作機械の送り駆動系と主軸駆動系の特性と切削力との連成シミュレーションを行う方法を開発した。加工試験とそのシミュレーションを行い、開発したシミュレーション方法の妥当性を検証したので報告する。

2. 実験方法

本研究では、図1に示す5軸立形マシニングセンタを用いて実験を行った。本研究における切削条件を表1に示す。実験では、図1に示すように、工具をX軸負方向に送り、スクエアエンドミルによる外周刃加工を行った。切削中の切削力を動力計により測定するとともに、主軸頭側面に加速度計を取付け、加工中の機械振動を測定した。また、送り軸のトルク指令とフィードバック速

Table 1 Cutting condition

Workpiece material	JIS S50C
Tool shape	φ10 square end mill
Helix angle	30 deg
Number of flutes	2
Cutting directions	Down
Spindle speed	600 rpm
Axial depth of cut	8 mm
Radical depth of cut	0.4 mm
Feed speed	200 mm/min

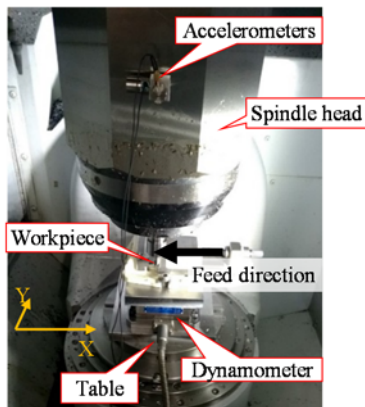


Fig.1 Experimental set-up

度および加速度、および主軸のトルク指令と主軸回転数を測定し、シミュレーション結果と比較した。なお、主軸および送り軸のトルク指令、送り軸のフィードバック速度、主軸回転数の測定は、FANAC社製のサーボ調整ツールである「SERVO GUIDE」を用いて行った。

3. 駆動系の特性と切削力との関係

3.1 シミュレーション方法

本研究で開発したシミュレーション方法の概要を図2に示す。送り駆動系と主軸駆動系の動的な数学モデルにより送り速度、位置、主軸回転数および工具回転角を計算し、切削力モデルにより各時間ステップにおける切削力と切削トルクを計算する。その結果を送り駆動系と主軸駆動系のモデルに外乱として印加することで、切削力により生じる工作機械駆動系の運動の変化をシミュレーションする。これを時間ステップ 0.1 ms ごとに繰返すことで、工作機械駆動系と切削力との連成シミュレーションを実現した。

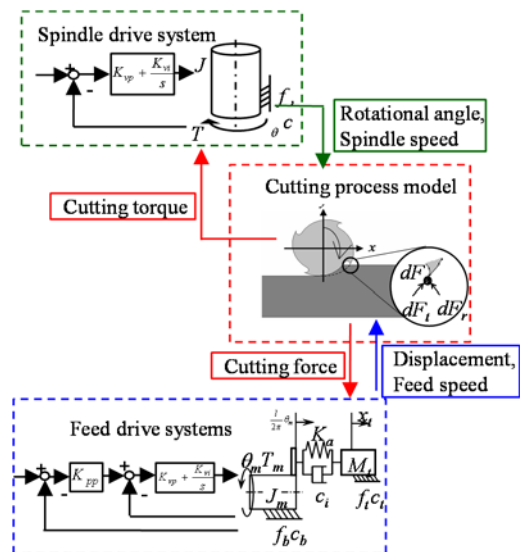


Fig.2 Proposed simulation method

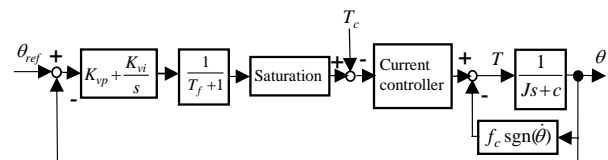


Fig.3 Block diagram of spindle drive system

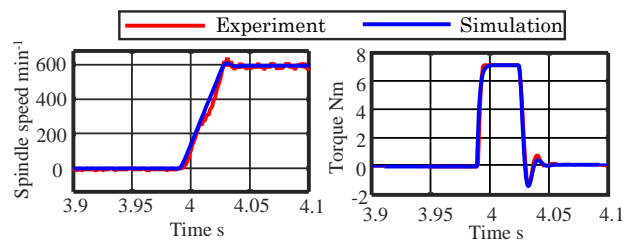


Fig.4 Measured and simulated spindle speed and torque

3.2 送り駆動系のモデル

実験に用いた工作機械は、X軸が1本のボールねじ、Y軸が2本のボールねじで駆動されている。送り駆動系のモデルには、著者らの研究室でこれまでに開発されたものを用いた。このモデルにより送り駆動系の特性を表現できることは確認されている¹⁾。

3.3 主軸駆動系のモデル

実験に用いた工作機械では、主軸モーターの回転がそのまま工具の回転となるビルトインモーター方式となっており、減速機などを介していないため、主軸モーターのみを考慮した1自由度系として表現した。制御系を組み合わせたブロック線図を図3に示す。図4は、主軸を停止状態から600 rpmで回転させたときの速度およびトルク波形である。実験結果とシミュレーション結果はよく一致しており、主軸駆動系の特性を表現できている。

4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

切削力の測定結果とシミュレーション結果を図5に示す。図によると、X軸方向とY軸方向の切削力について、測定結果とシミュレーション結果はその波形と大きさが一致していることがわかる。しかし、シミュレーション結果では2枚の刃による切削力は同じ波形となるのに対し、測定結果では2枚の刃の切削力波形が異なっている。このことの原因として、工具の偏心もしくは摩擦が考えられる。

加工中の主軸頭の振動について、X軸方向とY軸方向の測定結果およびシミュレーション結果を図6に示す。X軸方向の振動である図(a)によると、測定結果はシミュレーション結果よりも加速度振幅が大きく、シミュレーション結果には現れていない振動成分がみられる。これは、加速度計により測定された結果には本研究で用いた送り駆動系のモデルでは考慮していない振動成分が含まれているためである。主軸頭をX軸方向およびY軸方向に加振し周波数応答特性を確認したところ、モデルでは考慮されていない160 Hz付近の振動がみられた。

Y軸方向の加速度波形(図6(b))についてみると、その波形は測定結果とシミュレーション結果で大きく異なっている。本研究では送り駆動系の摩擦は符号関数を用いてクーロン摩擦としてモデル化している、今回の実験ではY軸は停止しているが、切削力の影響によりゼロをまたぐ速度の反転が生じ、その結果、今回の摩擦モデルでは実際の摩擦特性を正しく表現できていないためと考えられる。

送り駆動系の速度(図7)およびモータートルク(図8)について測定結果とシミュレーション結果とを比較すると、図7のフィードバック速度については、測定結果とシミュレーション結果とが細かい振動を除いてはよく一致している。しかし、図8のモータートルクについて比較すると、図(a)のX軸については細かい振動を除いてよく一致しているが、図(b)のY軸では、測定結果にオフセットがみられる。これは摩擦力による影響と考えられるが、原因を明らかにするには至っていない。

加工中の主軸回転数およびトルクの変動の測定結果とシミュレーション結果を図9に示す。図(a)の回転数をみると、細かい振動を除いて測定結果とシミュレーション結果がよく一致している。図(b)の主軸トルクをみると、おおその波形についてはシミュレーションできているものの、頂点付近の波形が測定結果とは異なる。このことの原因として、工具系の振動特性が考慮されていないことなどが考えられ、今後の課題である。

5. 結 言

本研究により得られた結論を以下に示す

- 1) 提案したシミュレーション方法により、駆動系の特性と切削力との連成シミュレーションが実現できた。
- 2) 加工中の切削力、送り運動中の送り軸の速度とトルク、および主軸回転数については細かい振動を除いて測定結果をシミュレーションできた。

今後、機械構造や工具系の振動特性も考慮したより詳細なシミュレーションを行う予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金基盤(C)15K05724により行われた研究の一部である。また、実験に使用した工作機械はMTTRF(Machine Tool Technologies Research Foundation)から貸与頂いたものであり、関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Kentaro NISHIO, Ryuta SATO and Keiichi SHIRASE: Influence of Motion Error of Feed Drive Systems on Machined Surface, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.6, No.6, (2012), pp.781-791.
- 2) 林晃生, 柏木洋慶, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル外周刃加工における数値制御工作機械駆動系の消費エネルギー, 精密工学会誌, Vol.81, No.5, (2015), pp.429-434.
- 3) 朝比奈奎一, 横山哲男, 古川勇二: 加工精度予測可能なパーソナルCAD/CAMシステムの開発(エンドミルによる端面加工の場合), 日本機械学会論文集(C編), 61巻, 588号, (1995), pp.3423-3429.

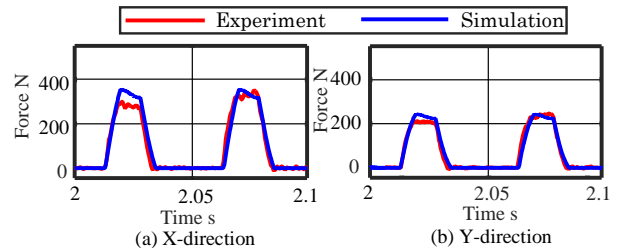


Fig.5 Comparison of measured and simulated cutting force

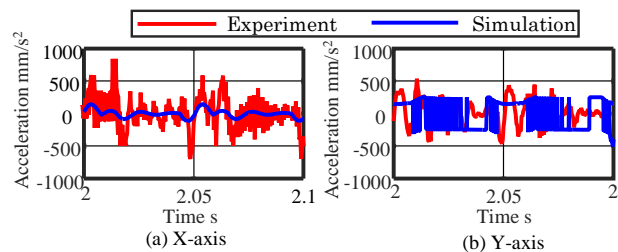


Fig.6 Comparison of measured and simulated acceleration

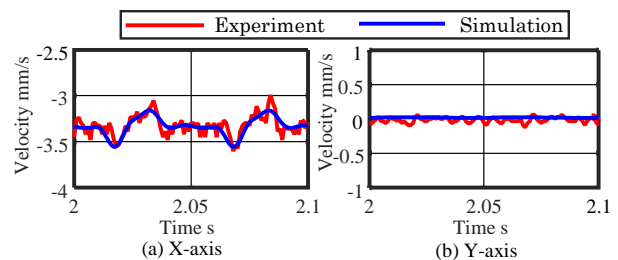


Fig.7 Comparison of measured and simulated feedback velocity

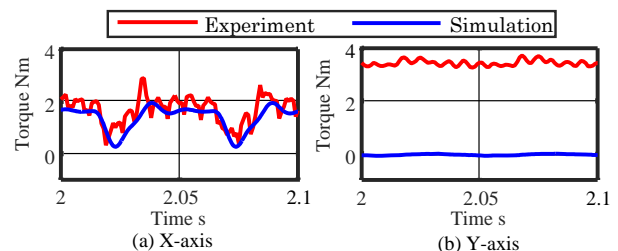


Fig.8 Comparison of measured and simulated feed motor torque

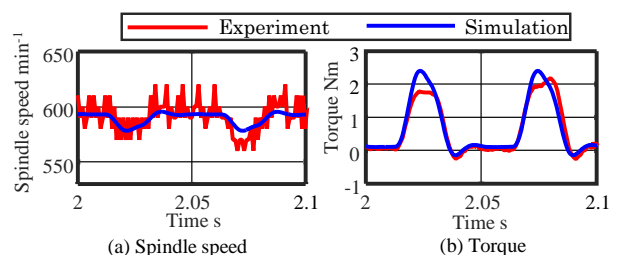


Fig.9 Comparison of measured and simulated spindle speed and torque