

高速輪郭運動精度向上のための機台支持機構の検討

神戸大学 白濱優作, 高須賀裕介, ©佐藤隆太, 中辻秀憲, 白瀬敬一

要 旨

本研究では、工作機械の機台支持機構を改良することで高速輪郭運動時に生じる振動を低減できるか実験とシミュレーションの両面から検討した。すべり面を有する機台支持機構を組み込んで加振実験と運動精度測定を行い、その影響を実験的に調査したほか、送り駆動系および機械構造の振動モデルを構築してシミュレーションを行い、機台支持機構の特性が及ぼす影響を振動モデルで表現できるかを検討した。その結果、機台支持機構にすべり面を設けることで高速輪郭運動時の振動を低減できることが確認された。

1. 緒 言

生産性の向上やコストの削減のため、工作機械には極めて高速で高精度な輪郭運動が要求される。しかし、工作機械のワークテーブルや主軸ヘッドを高速駆動すると、加減速時に発生する慣性力によって機械振動が励起されることで工具テーブル間に相対振動が発生し、軌跡精度や加工面品位の悪化につながるという問題がある。

工作機械の機械振動に関しては、支持剛性が大きな影響を与えていることが明らかにされている¹⁾。そこで本研究では、高速輪郭運動精度を向上することを目的として、すべり面を設けた支持機構を組み込んで高速輪郭運動時の機械振動を低減できるか、加振実験と運動軌跡測定とを行った。さらに、機台支持部の違いによる影響をシミュレーションにより表現できるか検討した。

2. 実験方法

2.1 機台支持機構

本研究では、小形の立て形マシニングセンタを用いて実験を行った。この機械は4ヶ所の機台支持部で支持されている。各機台支持機構の模式図を図1に示す。図1(a)は通常の機台支持機構であり、図1(b)が本研究で試験したすべり面を有する機台支持機構である。上側サポートと下側サポートとの間にすべり面を設け、機械が横方向にスライドできるようにした。すべり面はその表面粗さが $1\ \mu\text{m}$ 程度になるよう汎用旋盤により面出しを行っている。加工後のすべり面は通常のウェスによりふき取った状態で実験を行った。

2.3 運動軌跡と機台変位の測定

テーブル上にグリッドエンコーダを設置し、輪郭運動時の運動軌跡を測定した。その様子を図2(a)に示す。グリッドエンコーダによる測定結果はテーブルとヘッドの位置を表している。運動軌跡の測定とあわせて、機台支持部付近のベースの変位を電気マイクロメータにより測定した(図2(b))。

3. 工作機械の数学モデル

3.1 数学モデルの構築

本研究では、テーブル、サドル、ベース、コラム、ヘッドにそれぞれX軸方向、Y軸方向、Z軸方向の並進とX軸周り、Y軸周り、Z軸周りの回転の計6自由度と、各軸モータの回転角度にそれぞれ1自由度をもち、機械全体で合計33自由度を有する、図3に示す力学モデル²⁾を用いてシミュレーションを行った。このモデルにより、送り駆動系の運動とそれに伴う機械構造の振動とを的確に表現できることが確認されている。

このモデルでは、機台支持部はそれぞれ設置面との間のX、Y、およびZ軸方向の剛性と粘性として表現されている。これらの剛性および粘性を変更することで、機台支持部の特性の違いが運動に及ぼす影響を表現できると考えられる。

3.2 パラメータ同定

モデルの各要素の質量、慣性モーメントおよび要素間の距離にはCADモデルから計算した値を用いた。機台支持機構の剛性・粘性に関しては、CADモデルを用いて機械全体の重心の位置を計算し、前後の機台支持機構にかかる荷重の違い

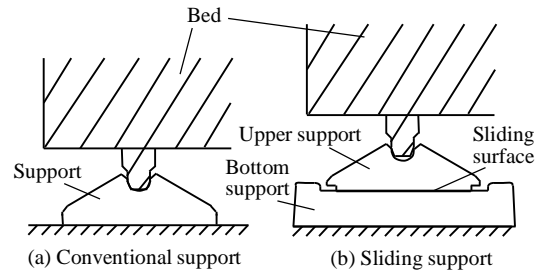


Fig. 1 Machine bed support

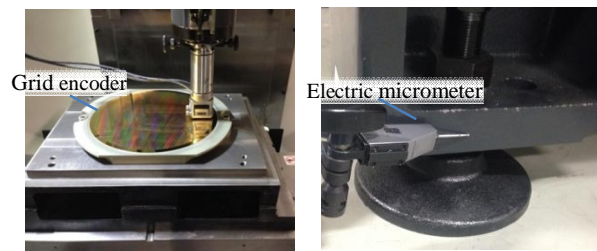


Fig. 2 Measurement method

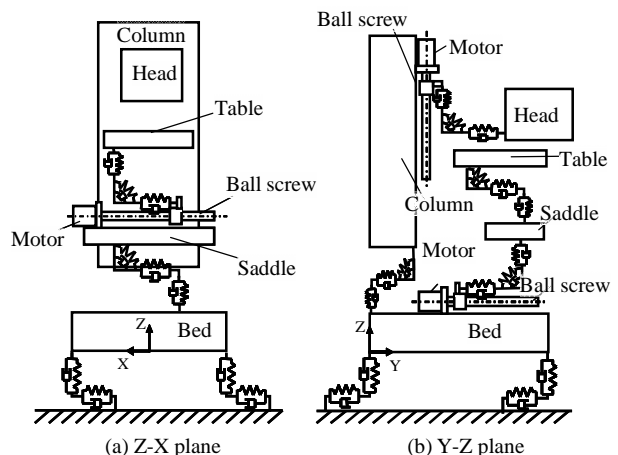


Fig. 3 Dynamics model of machine tool structure and feed drive mechanism

を考慮して接触面圧に対する等価ばね剛性と等価粘性減衰係数の関係³⁾より前後それぞれの剛性・粘性を決定した。また、コラムおよびベースのたわみを考慮したねじり剛性を計算により求めた。これらの値を初期値として、テーブルをX方向およびY方向にインパルスハンマで加振したときの周波数特性から、剛性および粘性を試行錯誤的に調整することでパラメータを決定した。

周波数応答特性の測定結果とシミュレーション結果を図4に示す。図4(a)はX軸方向、図4(b)はY軸方向の周波数特性であり、図によると最も振動が大きい50Hz付近の特性を的

確に表現できていることがわかる。50Hz 付近の振動は、X 軸方向では機械全体が Y 軸周りに回転するモード、Y 軸方向ではコラムが X 軸周りに回転して倒れこむモードであり、これらの振動が輪郭運動精度に影響を及ぼしていることが確認されている²⁾。

4. 機台支持機構の改良による振動抑制効果

4.1 運動中の機台変位

高速輪郭制御運動中の機台変位を測定し、すべり面を設けた機台支持機構を設置することで機台が変位するかを確認した。運動は図 5 に示すような対角線長さが 200 mm のひし形とし、送り速度は 20000 mm/min とした。

運動中の Y 軸方向の機台変位の測定結果とシミュレーション結果を図 6 に示す。図 6(a) の測定結果によると、通常の支持機構では、Y 軸の運動方向が反転する B および D 点付近において 10 μm 程度の変位がみられるものの、その後もとの位置に戻っているのに対し、支持機構にすべり面を設けた場合には、Y 軸方向の運動が反転している B および D 点付近で 100 μm 程度変位し、そのままの位置に留まっている。このことから、すべり面を設けた場合には機械全体が運動中に横方向に変位していることがわかる。

図 3 の力学モデルにおいて、支持部の X および Y 方向剛性を 0 とし、粘性を調整することで、運動中の横方向の変位を表現できるようにした。機台変位のシミュレーション結果を図 6(b) に示す。図によると、すべり面を設けた場合、すなわち支持部の横方向剛性を 0 にした場合には、Y 軸の運動方向が反転する B および D 点で測定結果と同程度の変位が生じていることがわかる。シミュレーション結果では X 軸の運動方向が反転する C 点付近でも変位が生じているが、これは X 軸の運動方向が反転することによるモーメントが Y 軸方向にも影響を及ぼしたためである。また、実験結果では A および D 点でオーバーシュートと振動がみられるが、このことの原因を明らかにするには至っていない。

4.2 周波数特性および運動軌跡

支持部に設けたすべり面の有無による Y 軸方向の周波数特性の違いを図 7 に示す。図によると、実験結果とシミュレーション結果の両方において、支持部にすべり面を設けたことで、50Hz 付近の振動ピークの高さが低減されていることがわかる。図 7(a) の実験結果ではすべり面を設けた場合に 80Hz 付近の振動が大きくなっているが、このことの原因を明らかにするには至っていない。

すべり面の有無が高速輪郭運動時の運動軌跡に及ぼす影響を図 8 に示す。図はグリッドエンコーダによる測定結果およびそのシミュレーション結果である。図 8(a) によると、支持部にすべり面を設けることで、Y 軸の反転に伴い軌跡上に生じていた振動が低減されている。これは、すべり面が存在した場合には機械全体が変位することにエネルギーが用いられ、機械振動が励起されにくくなったためと考えられる。図 8(b) のシミュレーション結果においても、実験結果と比べてその効果は小さいものの振動が低減されていることがわかる。

5. 結 言

本研究により、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 機台支持機構にすべり面を設けることで、高速輪郭運動時に生じる振動を低減できる。
 - (2) 本研究で構築したモデルにより、機台支持機構の特性が輪郭運動精度に及ぼす影響を表現できる。
- 今後、すべり面の表面粗さや潤滑状態による影響についても調査する予定である。

参 考 文 献

- 1) 河野大輔, 稲垣孝洋, 松原厚: 接触剛性が工作機械の支持剛性に与える影響に関する研究, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2011), pp351-352.
- 2) 高須賀裕介, 佐藤隆太, 白瀬敏一: ベッドのねじり振動と送り駆動機構の摩擦を考慮した数値制御工作機械の状態方程式

表現モデル, 日本機械学会第 10 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2014), pp.143-144.

- 3) 河野大輔, 稲垣孝洋, 松原厚, 山路伊和夫: 工作機械の支持剛性の推定に関する研究, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2012), pp351-352.

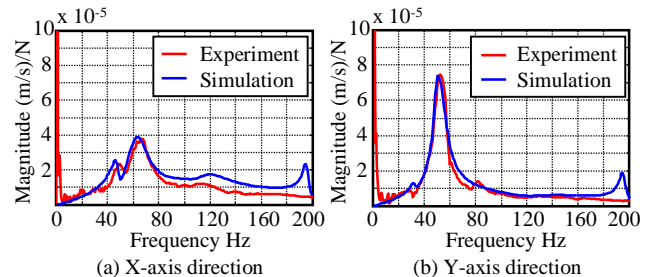


Fig. 4 Comparison of frequency responses of table

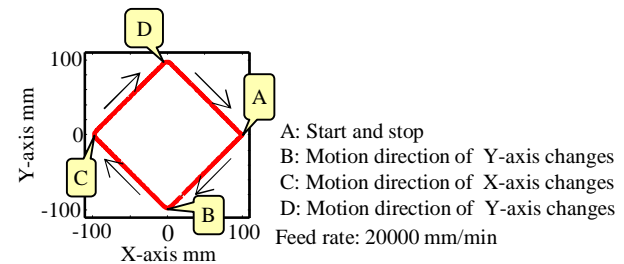


Fig. 5 Motion path for the tests

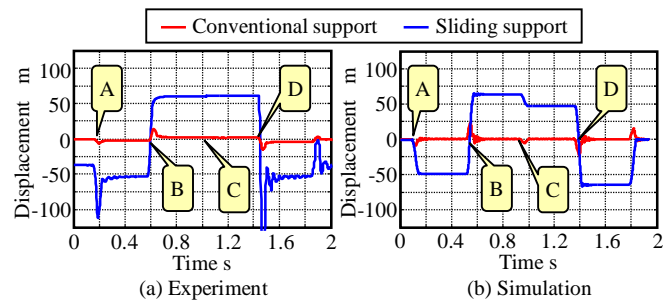


Fig. 6 Comparison of displacement of bed along Y-axis

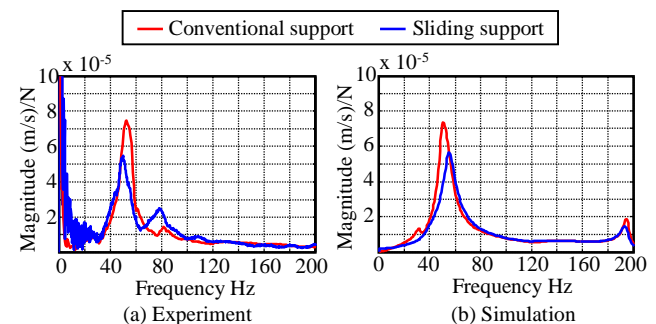


Fig. 7 Effect of the sliding support onto frequency response

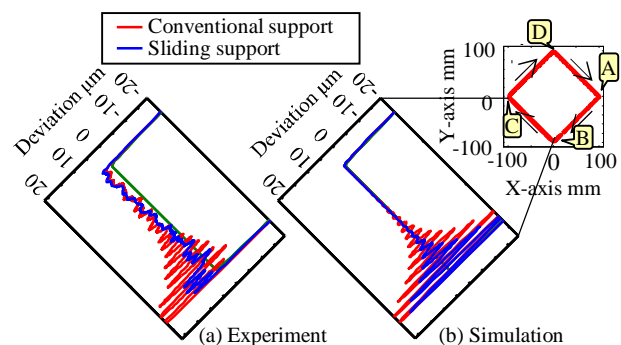


Fig. 8 Effect of the sliding support onto motion trajectory