

振動補償トルクによる高速輪郭運動時の機械振動抑制方法

神戸大学 ○林 秀明, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

要 旨

NC 工作機械には高速な輪郭運動が求められるが、コーナ部では急激な加減速による機械振動が発生して運動精度が悪化する。本研究では、振動補償トルクを送り軸サーボモータのトルク指令に印加することで、加減速による振動を相殺し、コーナ部での振動を抑制する方法を提案する。実際のマシニングセンタに提案する方法を組み込み、コーナ部運動時の振動抑制効果を確認した結果、輪郭運動時の機械振動を効果的に抑制できたので報告する。

1. 緒 言

生産現場において、製品品質と生産効率の向上のため、数値制御工作機械には高速かつ高精度な輪郭制御運動が求められる。しかし、工作機械を高速なサーボモータで駆動すると加減速時に発生する慣性力により機械振動が励起され、加工品品位を悪化させることが知られている¹⁾。工作機械の振動抑制に関しては、指令に対するフィルタ処理やサーボ系のパラメータ調整を用いた振動抑制手法の研究がなされているが²⁾³⁾、軸ごとに固有振動数が異なり振動数が低い機械構造の振動などを抑制しようとした場合、とくに同時 2 軸制御以上の輪郭制御運動において、軌跡誤差や追従性の低下を引き起こす場合があった。そこで本研究では、トルク指令に外乱として補償トルク指令を印加することで、加減速時に発生する振動を相殺する振動抑制方法を提案し、実験においてその抑制効果の検証を行った。

2. 実験方法

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う。実験に使用したマシニングセンタの各軸は AC サーボモータとボールねじにより駆動される。テーブル側に XY テーブルが配置され、Y 軸のうえに X 軸がのった構造となっている。図 1 に示すようにマシニングセンタのテーブル上に平面内での自由な相対運動が測定可能なグリッドエンコーダを設置し、輪郭制御運動時のテーブルヘッド間の相対変位を測定した。また、同時にテーブル側面に加速度計を設置しテーブルの Y 軸方向の加速度も測定するとともに、各軸の位置指令、位置フィードバック、モータトルクについても記録した。実験のための輪郭制御運動は、図 2 に示すような対角線の長さが 200 mm のひし形運動とした。

3. 振動補償トルクによる振動抑制

3.1 振動抑制の原理

本研究で提案する機械振動抑制方法の概要を表すブロック線図を図 3 に示す。送り駆動系には位置制御ループと速度制御ループが存在し、位置制御器は比例制御、速度制御器は比例積分制御となっている。また位置制御器は、モータの回転角度をフィードバック信号とするセミクローズド制御となっている。

提案する振動抑制方法では、加減速が起こるタイミングで、速度制御系から出力されるトルク指令に外乱として補償トルク指令を印加し、加減速時により生じる振動と同じ振幅で逆位相の振動を生じさせることで、加減速による振動を相殺する。ここで R は、サーボモータの回転角度を軸方向変位に変換する係数である。

3.2 補償トルクを構成するパラメータ

提案する補償トルクの概要を図 4 に示す。補償信号はステップ入力の重ね合わせとして表現される矩形波状のトルク指令であり、補償の大きさ T_c と補償の持続時間 T_l とで構成される。加減速時の加速度指令が設定したしきい値 A に達した時刻を基準時刻 T_s とし、そこから補償入力タイミング T_d 秒後に補償信号を発生させる。高周波成分が含まれる矩形波をトルク指令に印加すると、望ましくない振動やそれによる騒音が発生するため、補償信号にハイカット型 2 次の IIR ローパスフィルタを適用した。フィルタのカットオフ周波数 F_c は、Y 軸の運動方向が反転する際に生じる振動の周波数である 50 Hz に設定し、フィルタの Q 値は 0.5 とした。

3.3 コーナ部における振動とその抑制

コーナ部で生じる振動と特性を調査するため、送り速度を 10000 mm/min でのひし形運動を行い、Y 軸の運動方向が反転する B 地点での加速度指令とテーブルの Y 軸方向加速度を測定した。その結果を図 5 に示す。図によると、加減速によりテーブルに 50 Hz の振動が励起されている。これは、コラムの倒れと送り駆動系の特性とが連成した振動モードであることがわかっている⁴⁾。

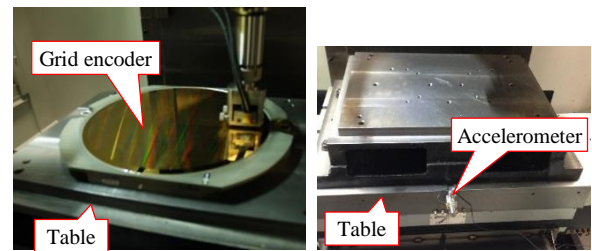


Fig. 1 Measurement set-up

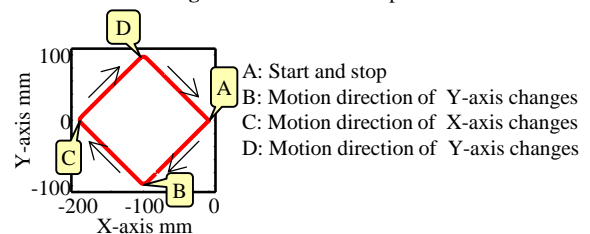


Fig. 2 Motion pass for the test

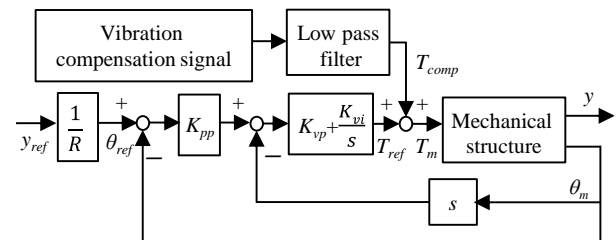


Fig. 3 Proposed vibration suppression method

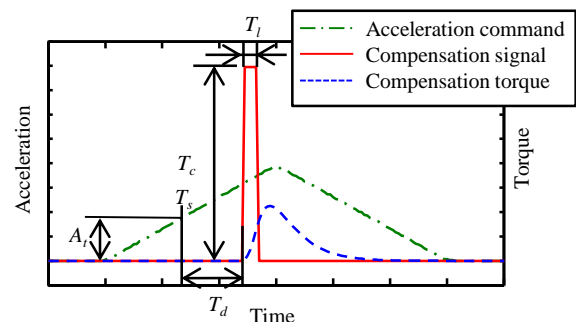


Fig. 4 Vibration compensation torque

等速運動中に補償トルクを印加し、それにより励起される振動を測定した結果を図 6 に示す。図によると、補償トルクをトルク指令に加算することで、加減速により生じるものと同じ周期の振動が発生することがわかる。提案する振動抑制方法では、補償の大きさと補償入力タイミングを調整することで、所望の振幅と位相の振動を発生させ、加減速による振動を相殺する。

加減速にあわせて補償トルクを印加したときの加速度の測定結果を図 7 に示す。図によると、加減速による振動と補償トルクによる振動とが打ち消しあうことで、補償トルクを印加しない場合に生じていた振動 (図 5) が大幅に小さくなっている。

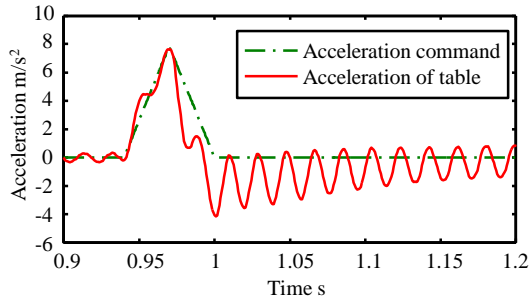


Fig. 5 Acceleration of table at corner B where motion direction of Y-axis changes

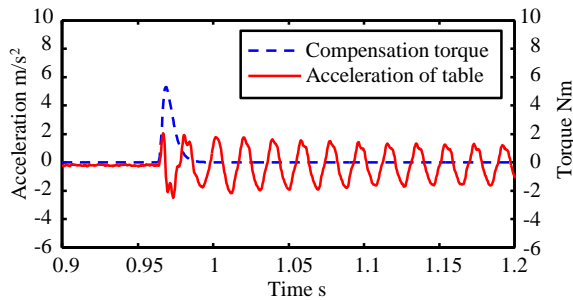


Fig. 6 Oscillated vibration by compensation torque

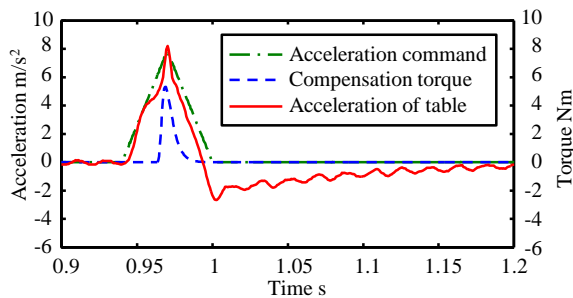


Fig. 7 Acceleration of table at corner B with compensation torque

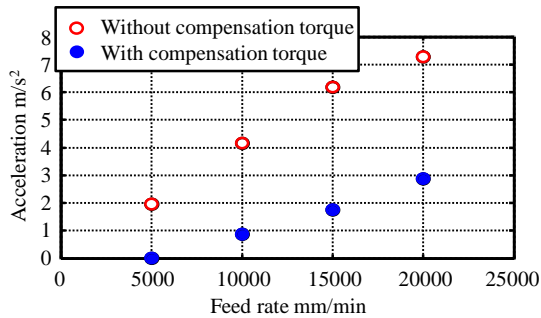
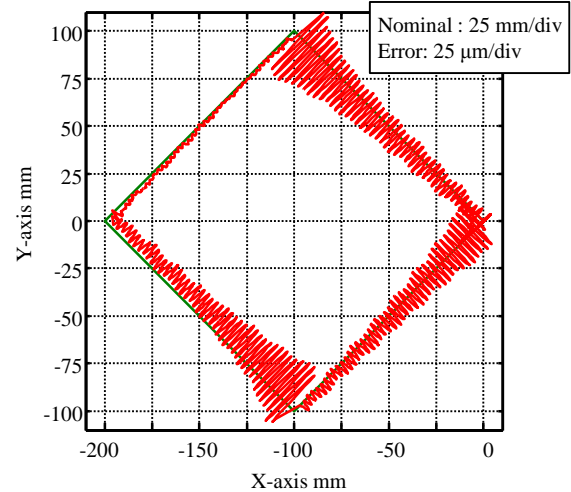


Fig. 8 Relationship between feed rate and acceleration amplitude of vibration

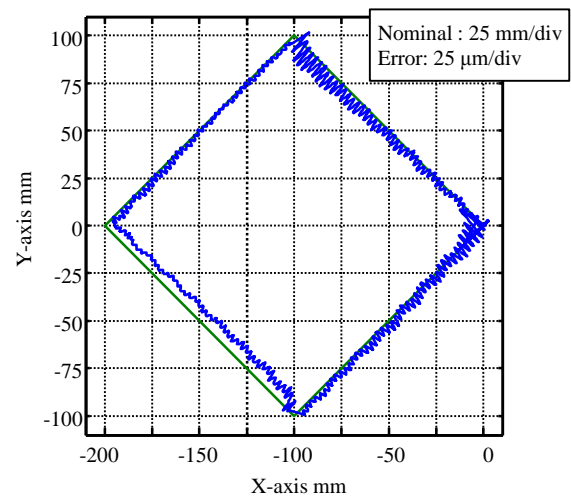
本研究で実験に用いたマシニングセンタの制御装置では、加減速のパラメータとして加減速時間を設定する。この場合、送り速度が高いほど加減速時間も大きくなり、加減速時により大きな振動が生じる。図8に送り速度と加減速で生じる振動の加速度振幅との関係を示す。補償の大きさと振動振幅との間にも比例関係があることが確認されており、補償の大きさも送り速度に比例させることで、送り速度が変化した場合でも振動が抑制できるか確認した。図8によると、補償トルクを印加した場合には、どの送り速度でも、振動振幅は半分以下になっていることがわかる。

4. 運動軌跡における振動抑制効果

送り速度を10000 mm/minとしたひし形運動において提案する振動抑制方法を適用した結果を図9に示す。図は、目標軌跡に対する法線方向の誤差を1000倍に拡大して表示している。図(a)は補償トルクを印加しない場合の結果であり、質量の大きいY軸が反転した後に振幅20 μm以上の振動が現れている。一方、補償トルクを



(a) Without compensation



(b) With compensation

Fig. 9 Comparison of motion trajectories (10000 mm/min)

印加した場合の結果である図(b)をみると、軌跡上の振動の振幅は大幅に小さくなっており、本研究で提案した振動抑制方法で高速輪郭制御運動時の振動を抑制できることがわかる。

送り速度を変えた場合でも、送り速度が高くなった場合に振動抑制効果の劣化があったものの、どの送り速度でも軌跡上の振動を半分以下に抑制できることが確認されている。

5. 結 言

本研究において以下に示すことが明らかとなった。

- (1) トルク指令に振動補償トルクを外乱として印加し、振動を発生させることで、加減速による振動を相殺して機械振動を抑制できる。
- (2) 本研究で提案した振動抑制方法により、高速輪郭制御運動時に軌跡に現れる機械振動を効果的に抑制できる。

今後、テーブル位置の違いによる特性の変化による影響や、補償パラメータの自動調整方法についても検討を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 松原厚, 梅本雅資, 濱村実, 藤田純, 甲斐斐章, 垣野義昭: ベース振動の影響を受ける NC 工作機械送り系 (第1報), 精密工学会誌, 70, 4, (2004), 583.
- 2) Burak Sencer, Kosuke Ishizaki, and Eiji Shamoto: High Speed Cornering Strategy with Confined Contour Error and Vibration Suppression for CNC Machine Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64, (2015), 369.
- 3) 鈴木康彦, 松原厚, 垣野義昭, 茨木創一, 李康圭: 工作機械の輪郭精度向上をめざした CNC パラメータチューニングに関する研究, 精密工学会誌, 69, 8, (2003), 1119.
- 4) Ryuta Sato, Gen Tashiro, and Keiichi Shirase: Analysis of the Coupled Vibration between Feed Drive Systems and Machine Tool Structure, International Journal of Automation Technology, 9, 6, (2015), 689.