

残留振動振幅の解析に基づく 加減速時間の変化に対応した位置決め指令設計方法

神戸大学 ○近藤大智, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

要 旨

振動を励起しない加減速指令の設計方法はこれまでも検討されているが、低周波数域の振動を抑制しようとする位置決め時間の増大を招くことがあった。本研究では、加減速中の躍度変化のパターンと発生する振動振幅との関係を定式化し、総加減速時間と抑制対象の振動の振動数とから、総加減速時間を変えずに残留振動の振幅を最小にする加減速指令を一意に設計する方法を開発し、実験によりその有効性を検証した。

1. 緒 言

数値制御工作機械において、生産効率向上のためには高速な位置決めが要求される。しかし、高速な位置決め運動を行うと位置決め後に残留振動が発生する。この振動が収まるまでに加工を始めると加工面に縞模様が生じるなどの問題が生じるため、残留振動が収まるのを待つ必要が生じ、生産効率を低下させる要因になる。そのため、工作機械の残留振動抑制について、指令の時定数を調整することや、指令に対してフィルタ処理を行うという手法が提案されている¹⁾²⁾、とくに低周波数の振動を抑制しようとする加減速時間が増大してしまうという問題があった。そこで本研究では、加減速指令の設計による振動抑制方法において、総加減速時間を変えずに、加減速中の躍度変化を適切に設計することで発生する残留振動の振幅を低減する方法を検討した。そのために、加減速時間と移動量との関係に基づいて、加減速中の躍度変化のパターンと発生する振動振幅との関係を定式化した。その結果に基づいて、総加減速時間を変えずに残留振動の振幅を最小にする加減速指令を、加減速時間の変化に対応して一意に設計するアルゴリズムを開発し、実験によりその有効性を検証した。

2. 実験方法

本研究では、小型の立て形マシニングセンタを用いて実験を行い、加工前に必ず行われる Z 軸を負方向に位置決めする運動を評価対象とした。図 1 に示すように、マシニングセンタのテーブル上に S45C ブロックを介して静電容量式の変位計を固定し、位置決め運動時のテーブルとヘッドとの間の相対変位を測定した。また、運動中の位置指令を工作機械の制御装置に備えられた波形記録機能を用いて取得した。

3. 加減速指令と発生する残留振動の振幅

3.1 加減速時の加速度波形

位置決め時には、加速度の微分値である躍度を制限した加減速波形が多く用いられている。躍度を制限した場合の加減速指令における加速度波形の例を図 2 に示す。加速時の加速度指令の最大値を A_1 m/s²、減速時の加速度指令の最大値を A_2 m/s²、加速時の加速度漸増時間を T_1 s、加速時の加速度漸減時間を T_2 s、減速時の加速度漸増時間を T_3 s、そして減速時の加速度漸減時間を T_4 s とすると、送り量 L m から、 T_1 、 T_2 、 T_3 、および T_4 とそれぞれの区間での躍度 J_1 m/s³、 J_2 m/s³、 J_3 m/s³、および J_4 m/s³ の値が決定できる³⁾。通常加減速指令では、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 はすべて同じ値に設定されるが、総加減速時間 T_{SUM} s を固定したまま T_1 から T_4 を一定の条件下で変化させることで、残留振動を抑制できる⁴⁾。本研究では、 $T_1 = T_4$ および $T_2 = T_3$ とし、総加減速時間 T_{SUM} と抑制対象の振動の固有振動数をパラメータとして最適な加減速指令を設計する。 $T_1 = T_4$ および $T_2 = T_3$ とした条件下において、残留振動の振幅を最小とする加速時の加速度漸増時間 T_1 が決定できれば、 T_2 、 T_3 、および T_4 とそれぞれの区間での躍度 J_1 、 J_2 、 J_3 、および J_4 の値が一意に決定できることがわかっている⁴⁾。

3.2 発生する振動の振幅

図 2 のような波形の加速度指令によって励起される振動の振幅を、簡単な二次系の伝達関数を仮定して解くことで、特定の周波数の振動において予測される加減速に伴う振動の振幅を定式化すると、振幅 x は式(1)のように求められる。

発生する残留振動の振幅は、発生する残留振動の角振動数 ω_n rad/s、位置決め時の送り量 L 、加速時の加速度漸増時間 T_1 および総加減速時間 T_{SUM} の関数として表されるため、任意の角

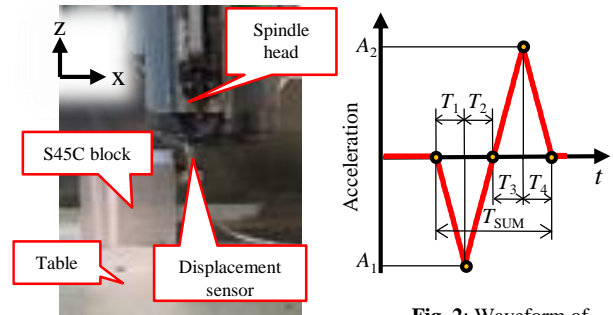


Fig. 1: Measurement set-up.

Fig. 2: Waveform of acceleration command.

振動数 ω_n 、送り量 L 、そして総加減速時間 T_{SUM} を与えると、その位置決め運動時に生じる残留振動を最小にする加速時の加速度漸増時間 T_1 を決定できると考えられる。

$$x = \frac{12L}{T_1 T_{SUM} \omega_n (T_{SUM} - T_1)} \left\{ \left(\frac{T_{SUM}}{T_{SUM} - 2T_1} \right) \sin \omega_n \left(\frac{T_{SUM} - 2T_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\omega_n T_{SUM}}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

4. 加減速指令の設計方法

4.1 振動が励起されない条件

式(1)で表される残留振動の振幅が 0 になるように加速時の加速度漸増時間 T_1 を決定すれば、位置決め後の残留振動を最小にできることになる。つまり、任意の ω_n と T_{SUM} を指定し、式(1)で $x=0$ とおいて T_1 について解くことで、 T_1 から T_4 、および各区間の躍度 J_1 から J_4 の値が一意に決定でき、総加減速時間を変えずに残留振動の振幅を最小にする加減速指令を一意に設計することが可能となる。

式(1)について、その変動成分(式(2))と定数成分(式(3))とに分けて考える。総加減速時間 T_{SUM} は少なくとも加速度漸増時間 T_1 の 2 倍以上である必要がある。すなわち、加速度漸増時間 T_1 は、 $0 < T_1 < T_{SUM}/2$ の範囲になければならない。その範囲では式(3)の定数成分は常に正の実数となるため、 $x=0$ とするためには、式(2)について $A=0$ とおいて T_1 について解くことで、最適な T_1 を決定できることになる。

$$A = \left\{ \left(\frac{T_{SUM}}{T_{SUM} - 2T_1} \right) \sin \omega_n \left(\frac{T_{SUM} - 2T_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\omega_n T_{SUM}}{2} \right) \right\} \quad (2)$$

$$B = \frac{12L}{T_1 T_{SUM} \omega_n (T_{SUM} - T_1)} \quad (3)$$

4.2 解が導出できない場合

$\omega_n = 60\pi$ (30 Hz) とした場合において、 T_{SUM} を 0.04 s とした場合と 0.07 s とした場合の 2 通りの条件で、式(2)に基づいて T_1 と振幅パラメータ A との関係を表示した結果である。一般に送り量を大きくすれば総加減速時間を長くする必要があり、0.04 s と 0.07 s は、それぞれ送り量を 1 mm と 3 mm としたときの総加減速時間である。

図 3 によると、総加減速時間 T_{SUM} が 0.07 s の場合には、 T_1 の適用可能な範囲である 0.035 s までの間に振幅パラメータ A が 0 となる T_1 が存在しており、4.1 節で述べた方法で残留振動の振幅を最小にする加減速指令を設計することが可能である。しかし、総加減速時間 T_{SUM} が 0.04 s の場合には、 T_1 の適用可能な範囲である 0.02 s までの間に振幅パラメータ A が 0 となる T_1 が存在せず、振動を抑制することのできる加減速指令が

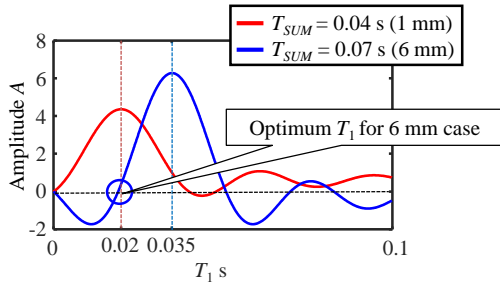


Fig. 3: Relationship between T_1 and amplitude parameter A

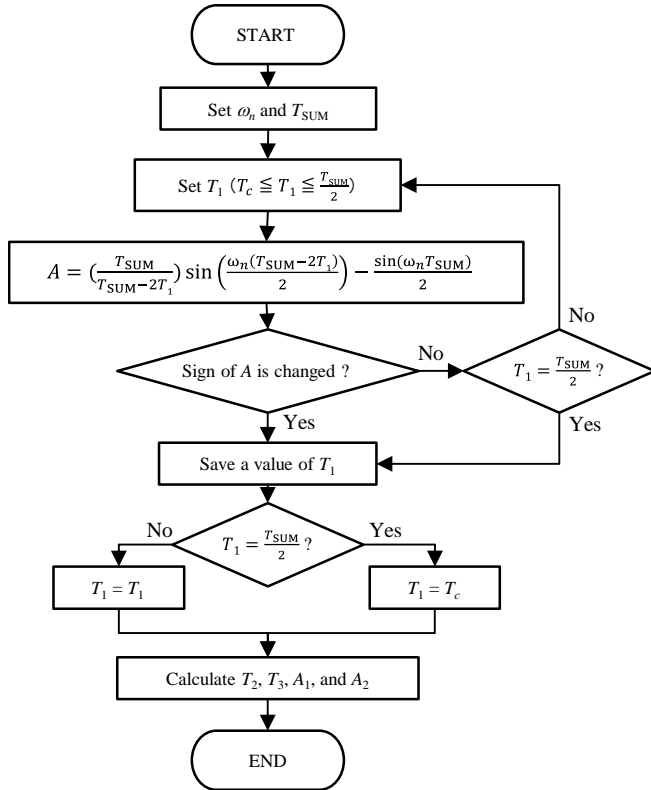


Fig. 4: Proposed algorithm to design the acceleration and deceleration process.

設計できない。

$\omega_n = 60\pi$ とした場合に解が見つからない総加減速時間 T_{SUM} の条件について調査したところ、その範囲は $0 < T_{SUM} < 0.0478$ であった。そこで、この範囲において発生する振動振幅 x の値の挙動について調べるため、ロピタルの定理を用いて $T_1 = 0$ における振幅 x と $0 < T_{SUM} < 0.0478$ の範囲における加速度漸増時間 T_1 に対する振幅 x の傾きを調査した。その結果、 $T_1 = 0$ では x は正、かつ、この範囲内では T_1 に対する振幅 x の傾きは常に正であることが判明した。つまり、 $0 < T_{SUM} < 0.0478$ の範囲において、振動振幅 x は加速度漸増時間 T_1 が小さいほど小さくなる。実現できる T_1 の最小値は制御装置内における指令の生成周期 T_c である。すなわち式(2)によって最適な T_1 が求まらない場合には、加速度漸増時間 T_1 を T_c とすればよい。

4.3 加減速指令設計アルゴリズム

以上のことから、図4に示す加減速指令設計アルゴリズムを構築した。これにより、総加減速時間 T_{SUM} と抑制対象の振動の各振動数 ω_n とから、総加減速時間を変えずに残留振動を抑制するための加減速指令を一意に設計することが可能となる。

式(2)を解析的に解いて T_1 を導くことができなかったため、本研究では、式(2)に T_1 代入して数値的に最適な値を求めた。そして、適用可能な範囲で解が求まらない場合には、 $T_1 = T_c$ として加減速指令を設計するものとした。送り量を変えて図4のアルゴリズムを適用し、その結果得られた加速度漸増時間 T_1 の値を、総加減速時間および従来の加減速指令における $T_1 (= T_{SUM}/4)$ の値とあわせて図5に示す。

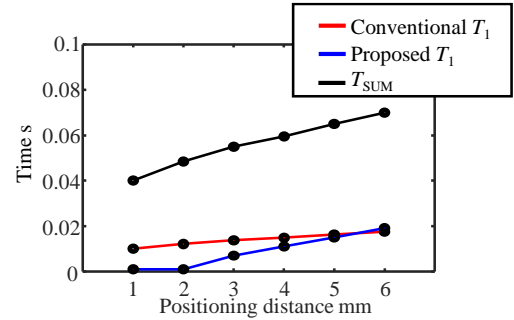


Fig. 5: Relationship between positioning distance and designed parameter.

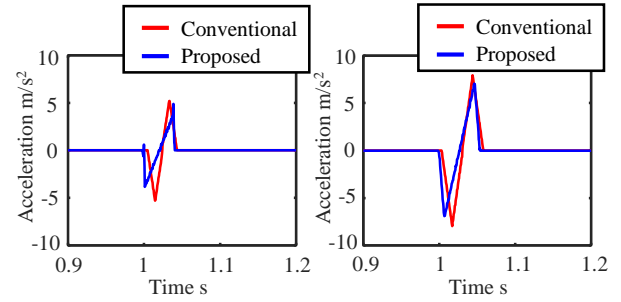


Fig. 6: Comparison of acceleration profiles.

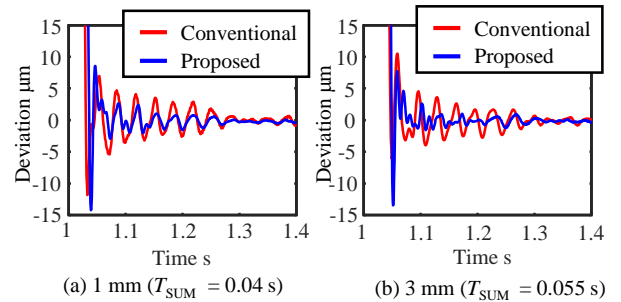


Fig. 7: Comparison of residual vibration after positioning.

5. 振動抑制効果の検証

送り量を 1 mm および 3 mm とした場合の加速度指令と残留振動の測定結果を図6および図7に示す。図によると、提案する方法により設計された加減速指令を用いた場合には、どちらの送り量でも残留振動の振幅が従来のものと比べ小さくなっていることがわかる。

6. 結言

本研究では、加減速時間の変化に対応して総加減速時間を変えずに残留振動の振幅を最小にする加減速指令を一意に設計するアルゴリズムを開発し、実験によりその有効性を検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 総加減速時間が一定値以上であれば、総加減速時間を変えずに残留振動を最小にする加速度漸増時間を方程式の解として決定できる。
- (2) 解が求められない場合には、加速度漸増時間をできる限り小さく設定することで残留振動を抑制できる。

参考文献

- 1) B. Sencer, K. Ishizaki, and E. Shamoto, High Speed Cornering Strategy with Confined Contour Error and Vibration Suppression for CNC Machine Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64, (2015) 369.
- 2) 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.
- 3) K. Erkorkmaz, Y. Altintas, High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, (2001), 1323.
- 4) 西嶋理彩, 佐藤隆太, 白瀬敬一: NC 工作機械における高速位置決め動作のための加減速指令設計方法, 第 62 回自動制御連合講演会講演論文集, (2019), 111-03.