工作機械の智能化の現状と加工事例*

Technology for Intelligent Machine Tools and Machining Example

千田治光**
Harumitsu SENDA

Key words machine tool, five-axis, rotary axis, geometric error, vibration, chatter stability, machining

1. はじめに

工作機械の使命は、所望の部品をいかに早く、安く、そして精度良く製造できるかであるといっても過言ではない。工作機械は工具の位置を転写することで加工を行うため、「加工する工作機械以上の精度で部品を生み出すことはできない」という母性原理が働く。そのため、主軸回転速度や送り速度の高速化、機械剛性の向上だけでなく、回転精度・案内精度・位置決め精度の向上が重要な要素として扱われてきた。ところが近年、生産性や加工精度のさらなる向上が要求されるようになってきており、それらを実現するための智能化技術が急速に発達している。

この進化の仕方をわかりやすいイメージで表現すると工作機械がロボット化してきているといえる。すなわち、これまで工作機械はNCプログラムという指令どおりに、いかに従順に動くかが重要と考えられてきたが、最近では機械が自律的に精度や加工条件を変更するだけでなく、オペレータに対して情報発信するようになってきた。本稿では、これらの智能化技術について紹介する。

2. 自律的な精度向上機能

2.1 5軸制御工作機械

工作物を工作機械に装着し、粗加工から仕上げに至る加工までできれば、加工能率は飛躍的に向上させることができる。また、工作物の取り外しに伴う誤差がなくなるため、加工精度が向上するメリットもある。そのため、最近では5軸制御工作機械（以下5軸機）が広く普及してきている。ここで一般的な構造を図1に、加工事例として油田掘削用ドリルヘッドを図2に示す。このように加工能率の向上が期待できる5軸機であるが、3軸機に比べて精度を出すのが難しいといわれ、場合により精度が良くないともいわれる。これは5軸機では直進3軸に回転2軸が加わることで、誤差要因が増えることが一因である。この誤

差要因の中で最も基本的なものに、回転軸の芯ズレや傾きなどの「幾何誤差」がある。幾何誤差は、機械が製造・出荷されて生産工場に据え付けられた後、環境温度変化や床の変動などによって時間の経過とともに変化する。一般に鉄でできている工作機械は、頑丈で変化しないと思われているが、マイクロメートルレベルではこんなにやくのように柔らかく、熱で息をするように変化する。したがって、高い精度の加工を継続的に行うためには、機械を使用する環境での状態がどのようなものであるかを適宜調べてチューニングする必要がある。ただし、これを人が行うと手間がかかるばかりでなく、能率が低下してしまうため何のためにCNC装置が付いているのかと考えたくなる。

2.2 幾何誤差とは

幾何誤差とは、送り軸の位置関係に関する誤差のことであり、5軸機には表1に示す多くの幾何誤差が存在する。これの一つひとつが調べ、さらにはその誤差を考慮しながら加工することは困難であるが、誤差を考慮せずに加工を行うと想像以上に大きな加工誤差が出る。例えば、簡単な例として表1の「C軸の芯ズレX」、C軸から見ればX軸の位置オフセット誤差のみがあったとする。これを3軸機でもできるX軸とY軸の同時2軸で円加工を行うと全体的にオフセットするだけで真円度には影響がでない。ところが、図3(a)に示すNAS979規格にある円錐台の同

図1 5軸制御工作機械の構造例

図2 加工事例

*原稿受付 平成24年6月18日

**オークマ株式会社（愛知県丹羽郡大口町下小口5-25-1）

図3 円錐台加工への影響
(C軸ズレX)

表1 5軸機の幾何誤差 (C・A軸テーブル旋回形)

A軸ズレY	A軸ズレZ	C軸ズレX	C軸ズレY	X-Y軸直角度	Z-X軸直角度
A-Y軸直角度	A-Z軸直角度	C-Y軸直角度	C-X軸直角度	Y-Z軸直角度

図4 チューニングの流れ

時5軸加工試験を行うと、円錐面の形状は勾玉のような図3(b)になってしまう。さらに、やっかいなのはどの幾何誤差が原因であったかは加工結果からでは分かり難いことである¹⁾。

2.3 幾何誤差の自動チューニング

幾何誤差を工作機械が自動で計測し、その結果をもとに工作機械が自律的に補正制御を行えば、5軸機の高精度で高能率の加工が可能になる。そこでタッチプローブと呼ばれる主軸に取り付けるセンサで基準球を計測して幾何誤差を同定し²⁾³⁾、自動補償するシステムを開発した。計測のための操作は非常に簡単で、

① テーブル上に基準球を設置してタッチプローブを基準球の真上に位置決め

② 数回のキー・ボタン操作

を行うだけである。その後は全て自動で、いろいろな角度にテーブルを動作させて基準球の中心位置を計測する。所要時間は5~10分(計測する幾何誤差の数による)であるため、誰でも、早く、安定した精度で、簡単に実行することができる。そして結果をもとに幾何誤差が計算されて補正パラメータとして自動設定される。この一連の流れを図4に示す。この動作が完了すると手動モード、自動運転モードなどに関わらず、全ての動作で高精度な位置決め動作が可能になる。

2.4 自動チューニングの効果

本機能を用いて11個の幾何誤差を同定し、補正制御を行いながら、ボールエンドミルであらゆる角度で加工したところ、加工誤差による段差 $17\mu\text{m}$ から $4\mu\text{m}$ に大きく減

少した。

3. 加工条件探索機能

3.1 びびり振動

部品を早く加工しようとして、挑戦的な加工を行うと必ずといってよいほど遭遇するのが「びびり振動」である。びびり振動は、時に機械が揺れるほどの大きな振動になり、加工面品が悪くなるばかりでなく、工具寿命の低下や、振動により工作物が外れたり、工具やホルダの破損につながったりと危険をはらんでいる。そのため、オペレータは主軸回転速度や、送り速度、切り込み量などの加工条件をはじめとして、工具、ホルダ、治具などにも配慮しながら対策を行っていく。このとき、加工音やCNC装置の画面に表示される加工負荷が有力な対策情報として用いられるが、これらは経験の積み上げにより形成されたノウハウであるため暗黙知となることが多く、技能の伝承が難しいのが実状である。一方で、早く部品を仕上げるため、今まで加工ができていたのであれば「無理して条件を上げなくても」という心理がオペレータに働き、せっかくの挑戦を阻んでしまう。

3.2 びびり振動の種類とその対策

加工中に発生するびびり振動は分け方にもよるが5種類に分類することができる。そのなかでも、加工条件を最適化する上では、力外乱型強制びびり振動(以下、強制びびり)と再生型自励びびり振動(以下、再生びびり)の対策が重要である。これらの発生メカニズムを模式的に図5に示す。強制びびりは、フライス加工やエンドミル加工な

図5 びびり発生メカニズムの模式図

図6 加工条件探索機能の構成イメージ

どの断続切削による切削力の変動で発生することが多い。びびり振動対策は入力となる切削力を抑制することになるので、例えば送り速度（1刃当たりの送り）を下げたり、共振範囲から外したりすることでびびり振動が改善できる。これに対して、再生びびりは、機械振動による相対変位で残された一刃前の表面うねりと今回の振動による相対変位で発生する切り屑厚さの変動が原因で加工面にうねりが生じ、切削過程の中のうねりに起因した振動をフィードバックして拡大されることで発生する。つまり、切り屑厚さの周期的な変動が加振力となって生じる。そのため、回転速度を調整して切り屑厚さを一定にすることが有効な改善策となる。

3.3 びびり振動を利用した加工条件探索機能

前述のようにびびり振動の種類により対策方法が異なるが、経験豊かなオペレータを見ていると主軸回転速度や送り速度の変更、ならびに加工音の変化などからびびり振動の対策を適切に行っている。しかしながら、一般にはこれらの判断をするのは大変難しい。そこで、加工している機械が発生したびびり振動を計測し、周波数分析した結果をもとに強制びびりと再生びびりの診断結果をオペレータに表示する機能を開発した⁴⁾。システム構成を図6に、また加工時に発生したびびり振動で強制びびりの事例を図7(a)に、再生びびりの事例を図7(b)に示す。図中左上のところに波形にバツのマークが付いているのが強制びびりと判断した結果で、波形のみは再生びびりと判断した結果である。

ところで、強制びびりと再生びびりの判断ができたとしても、再生びびりの対策に有効な切り屑厚さを一定にする回転速度をオペレータが見つめることは容易ではない。これは、古くから知られた安定限界線図で主軸回転速度とびびり振動の関係を見ると理解することができる。一例を図8に示す。主軸回転速度が高くなるにしたがって安定領域

(a) 強制びびりの発生事例

(b) 再生びびりの発生事例

図7 びびりの診断表示例

図8 安定限界線図の一例

と不安定領域が交互に現れるが、工具-主軸系の固有振動数だけでなく加工している工具の刃数によっても変化する。また、山の幅が狭いと一般に10%刻みである主軸回転速度のオーバーライド機能では、安定領域である適切な回転速度を選ぶことが難しい。一方で生産性を高める要求に応えるため、古くから研究が行われている⁵⁾が、工具をインパルス加振して動特性を測定し、その結果を用いて安定限界線図を作成する手法が多いため、加工現場で広く使用するには導入コストや測定技術などの面で少々ハードルが高くなっている。

開発したシステムは、工具の刃数を入力しておけば主軸回転速度やびびり振動を自動取得して解析し、ごく短時間で複数の振動モードを考慮に入れた最適な主軸回転速度に制御することができる。また、制御結果はCNC画面に表

図9 トロコイド加工

(a) 3100 min⁻¹ 安定な加工

加工条件
のアップ

(b) 4000 min⁻¹ 不安定な加工

本機能による
条件探索

(c) 4600 min⁻¹ 安定な加工面

図10 トロコイド加工における主軸回転速度と加工表面

示されるためオペレータは加工状況を視覚的に確認することができる。

3.4 適用事例

工作物の溝加工を行う場合、工具の負荷を軽減させるために溝幅より小さな直径をもつ工具で円弧を描きながら高速に溝加工を行うトロコイド加工という方法がある。立形マシニングセンタを用いてトロコイド加工により加工した溝を図9に示す。φ8 mmのエンドミルで軸方向切り込み14 mm、半径方向切り込み0.5 mm、主軸回転速度3100 min⁻¹、切削送り量0.27 mm/revで加工した結果が図10(a)である。この条件ではびびり振動は発生していない。この加工方法で能率を上げるため主軸回転速度4000 min⁻¹に上げたところびびりが発生した。加工結果を図10(b)に示す。従来であれば、ここであきらめてもとの加工条件に戻すところであるが、本機能により自動で主軸回転速度を変更した4600 min⁻¹で加工した結果、びびり振動がなくなり安定に加工を行うことができた。加工結果を図10(c)に示す。主軸回転速度の向上と併せて切削送り速度も837 mm/minから1242 mm/minに上がり、加工能率が1.5倍に向上した。

4. おわりに

オペレータは、必要な工作物を精度よく、早く加工するため、日々努力をしている。そしてその技能レベルの差がひいては企業の競争力の差にもなることから、加工現場では、機械の状態を人の感覚によって最適な状況を判断することが行われてきた。しかし、一層早くなる市場変化に対応するには、加工時間を短くする数値上の問題だけでなく、加工担当者の短期間でのスキルの向上や競争力強化に

つながるチャレンジするための時間確保が大切である。これまでの工作機械は使用する人が機械の状態や環境を整えることで、必要な加工を実現してきたが、ここで紹介した技術は、加工精度や加工能率の向上のために、あたかも人と機械が会話をして、解決していく機能である。解決すべき多くの課題を考えれば、まだまだ一部の対応に過ぎないが、工作機械の真の目的の実現に向け、今後も知能化技術の開発を行っていく。

参考文献

- 1) 松下哲也, 沖忠洋, 松原厚: テーブルチルト型5軸制御工作機械によるテーパコーン加工精度, 精密工学会誌, **74**, 6 (2008) 632.
- 2) 松下哲也, 沖忠洋: タッチプローブを用いた5軸制御工作機械の幾何誤差同定, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2010) 1105.
- 3) 松下哲也, 沖忠洋: タッチプローブを用いた5軸制御工作機械の幾何誤差同定方法の検証, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (2010) 309.
- 4) 上野浩, 安藤知治ほか: 最適加工条件探索機能の開発について, 生産と加工に関する学術講演会, 8 (2010) 273.
- 5) Y. Altintas and E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, Annals of the CIRP, **44**, 1 (1995) 357.

千田治光

1987年大隈鐵工所(現オークマ株式会社)入社。2006年神戸大学大学院博士課程修了。研究開発部所属。要素技術の研究開発に従事。博士(工学)。