NC 工作機械の運動精度に関する研究(第6報)*

——円弧補間送り時のスティックモーションの生成機構とその補正——

垣野義昭** 井原之敏** 中津善夫*** 篠原章翁***

A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (6th Report)
- Generating Mechanism of the Stick Motion and its Compensation -

Yoshiaki KAKINO, Yukitoshi IHARA, Yoshio NAKATSU and Akio SHINOHARA

Generating mechanism of the stick motion, which occurs on the motion error during circular interpolation motion for NC machine tools, has been studied. The motion errors including the stick motion were measured by Double Ball Bar test. Then simultaneously feedback values of the servo motor, the encoder, the linear scale were measured to compare the relationships between them, and the stick motion is generated due to the time lag at servo motor reversing, where lost motion is due to the elastic deformation of ball-screw driving system. A feed-forward control method was developed to compensate the stick motion error.

Key words : NC machine tools, motion accuracy, circular interpolation, compensation, stick motion, lost motion

1. 緒 論

NC 工作機械上で円弧補間送り運動をさせた軌跡を拡大すると、各軸の運動方向が切り換わる際(象限切換え時)に、軌跡が円の外側に突き出たり(スティックモーション)、段差を生じたり(ロストモーション)していることが多い。これらは送り速度によって大きさが変化するので(特に前者については高速送り時に大きくなるため)、円弧補間加工時には輪郭形状に誤差をもたらす¹⁾。本研究ではこのスティックモーションによる誤差を減少させるため、まずその生成機構について研究することとした。そのために高速、高精度で円弧補間送りの精度が測定可能な DBB 測定を行い、同時に被測定機械の種々のサーボ系のフィードバック値をサンプリングして解析した。スティックモーションとロストモーションは同時に生じるだけでなく、互いに関連があるので、本研究ではロストモーションの生成機構についてもあわせて検討することとした。

スティックモーションの補正法については、アナログ回路の速度ループ内の積分コンデンサの極性をボー

ルねじ反転指令時反転させた結果が報告されているが、かえって逆方向に誤差を生じており必ずしも良い結果を得られていない²⁾。そこで、本研究では、ボールねじが実際に反転するのとほぼ同時に電機子電流の指令値を強制的に反転させる方法を検討し、実機による確認実験を行った。

2. スティックモーションとロストモーションの生成機構

2.1 スティックモーションとロストモーションの定義

スティックモーションとロストモーションの大きさを知るには DBB 測定を行うのが最も簡単である³⁾。大半の機械で、DBB 測定を行ったときの象限切換えの付近での運動誤差軌跡は、図1のようになる。図1において、半径方向に出ている突起をスティックモーション、段差をロストモーションと定義する。図のよ

Fig.1 Typical motion error trace at quadrant change of the DBB test

* 原稿受付 平成元年7月31日. 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月13日)にて発表

** 正 会 員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 学生会員 京都大学工学部

Fig.2 Data processing system used for the test

うな段差は、しゅう動体の姿勢変化によっても現れることはすでに明らかにされているが、本研究ではその生成機構に関しては姿勢変化以外の原因について考えることとした。

2.2 実験装置と方法

被測定機械として本研究で実験に使用したものは2台(機械A, B)である。機械Aはセミクローズドループ方式の小型の門型マシニングセンタである。機械Bは中型の立型マシニングセンタで、このNC装置は、パラメータの変更により、セミクローズドループ制御方式としてもクローズドループ制御方式としても用いることができる。これらの機械のNC装置はオールデジタルサーボ方式⁴⁾⁵⁾のもので、図2のようにエンコーダのフィードバック値などの種々の値を外部のパソコンからの指令によって記憶し、読み出すことができる。これらの機械はすべり案内を使用しており、ボールねじは一般的な工作機械とほぼ同一で、一端固定、他端支持で、スラスト方向の予張力を加えて剛性を高めている。

なお、しゅう動体の姿勢変化によって生じる象限切換え時の段差については、これらの機械に関しては他の方法(測定位置を変えたDBB測定)により姿勢変化は問題にならないほど小さいことが確認されている。

これらの機械の挙動を知るために、主としてXY平面で半径150mmの円弧補間送り運動を10~3000mm/minの各送り速度で行い、以下の4種類の測定を行った。

- (1) 機械の実際のテーブル上での動きを、DBB装置を用いて測定した。
- (2) エンコーダのフィードバック値をサンプリングし、ボールねじの回転角度およびそれによる位置を換算し求めた。また、リニアスケールのフィードバック値をサンプリングした。
- (3) サーボモーターの電機子電流の値をサンプリングし、それにトルク定数をかけてモータの出力トルクを求めた。
- (4) NCのZ軸キャンセルの機能を用いて、X軸だけを円弧補間と同じ運動をさせ、その動きを別置

の光学スケールで測定した。

ロストモーションについては、円弧補間送りの他に直線補間送り、早送りに関しても前述の項目((4)を除く)を測定した。早送りの送り速度の変更はオーバーライドを使用した。

2.3 実験結果と考察

1) ロストモーション

機械A(セミクローズドループ方式NC)におけるDBB法による運動誤差軌跡のうち、X軸(-)位置のみを抜き出したものを図3に示す。また、X軸のエンコーダフィードバック値から換算した運動誤差軌跡を同様に図4に示す。図5はZX平面で、半径R=150mmの円弧補間送りのプログラムを作成し、Z軸キャンセル機能を用いてX軸だけを動くようにして、X軸(-)位置でのボールねじ反転付近のしゅう動体の実際の位置、エンコーダフィードバック値から換算した見かけの位置とモータの出力トルクの変化の様子を示した。

図3と図4を比較すると、段差はエンコーダフィー

Fig.3 Motion error traces at X(-) (measured by DBB test)
1 div: 5 μm radius: 150mm Fig.4 Motion error traces at X(-) (encoder feedback values)
1 div: 5 μm, radius: 150mm

Fig.5 Output torque change of the servo motor and positions of the slider at X(-) radius: 150mm, feed: 500mm/min

ドバックには見られず、DBB法による運動誤差軌跡にのみ見られることがわかる。また図5ではボールねじが回転しているのにしゅう動体が静止している部分(A部)があることがわかる。以上の2点より、ロストモーションはボールねじとナット、およびこれらを支えている部分の弾性変形が主な原因と思われる。

さらに送り速度との関係を詳しく調べるために、機械Bにおける、セミクローズドループ方式での各送り方式、各速度でのY軸(+)での反転直前の出力トルクの平均値と、DBB測定軌跡から求めたロストモーション量を求めた。

送り速度と出力トルクを図6に示す。これよりサーボモータの出力トルクが送りの種類、送り速度によって変化することがわかる。サーボモータの出力トルクの大部分は、案内面でのしゅう動抵抗に占められると思われるので、この出力トルクの送り速度による変化は、送り速度によりしゅう動抵抗が変化するために生じるものと考えられる。しゅう動抵抗の変化の原因は、送り速度によって潤滑油の油膜形成状態が異なり、そのため油膜厚さが異なるためであると考えられる。すなわち、高速送りでは油膜が厚く、主に潤滑油の粘性抵抗によりしゅう動抵抗が発生するのに対し、低速送りでは油膜が薄く、主に案内面としゅう動面との摩擦によりしゅう動抵抗が発生する。また、直線補間に比べて円弧補間での出力トルクが大きいのもこのためである。すなわち、図6に示した送り速度は円弧補間の場合の周速のことであり、反転前後のY軸方向の実速度は非常に低速である。

図7に各送り速度の出力トルクとロストモーション量の関係を示す。これより反転直前（直線補間では停止中、円弧補間では運動中）の出力トルクとロストモーション量の間には直線的な関係があることがわかる。

Fig.6 Output torque of the servo motor at each feed rate

Fig.7 Relation between output torque of the servo motor and lost motion

前述のように、出力トルクの大部分がしゅう動抵抗に占められ、両者が線形な関係にあるならば、これは、軸方向に働く力であるしゅう動抵抗とロストモーション量が比例関係にあることになり、ロストモーションの原因はしゅう動抵抗による送り駆動系の弾性変形であると考えられる。

反転直前の出力トルクが同じであっても、ロストモーション量が送り速度によって異なり、低速になるほど大きく、高速になるほど小さいという傾向が他の機械を測定した結果から得られた。これは、高速送りでは減速時の慣性力が大きく、しゅう動抵抗による弾

Fig. 8 Delay error of the feedback values after reversing feed direction

性変形が一部回復されるためであると思われる。また、別の現象として、出力トルクが違ってロストモーション量が同じになるというばらつきが生じることもある。これは、送り駆動系の静剛性が、一定しないために生じる。

2) スティックモーション

機械Bにおいて、送り速度500mm/minでXY平面で円弧補間送りさせたときの、Y軸(+)での反転時の角度に対するフィードバック位置とモータの電流から換算した出力トルク、正弦曲線で与えられる理論値を図8に示す。

図8(a)よりボールねじ反転後約1.5°の間だけ、エンコーダフィードバック位置が指令位置に対して最大2μm遅れていることがわかる。また、遅れは増加しているときは出力トルクが反転中であり、反転完了すればフィードバック位置の遅れは急速に減少している。

Fig. 9 Stick motion and delay error of the position feedback values after reversing feed direction

図8(b)においても反転後、出力トルクの反転が完了し、一定になるまでスケールフィードバック位置は最大8μm遅れが生じている。反転直後のフィードバック位置は、出力トルクの符号が変わるまで停止しているため、この遅れは、しゅう動体の停止と移動後の回復によって生じる

ことがわかる。また、クローズドループ方式ではしゅう動体の停止を検出できるので、図8(a)のセミクローズドループ方式の場合と比較すると、出力トルクの反転が完了するまでに要する時間が短くなっている。逆にセミクローズドループ方式の場合はしゅう動体の停止を検出できないのでトルク反転のあいだ、しゅう動体は停止し、移動後もそれによる遅れは回復されないため、ロストモーションが現れることが容易に類推できる。

図8と同様に、機械Bにおいて各送り速度についてフィードバック位置の遅れの最大値と、同時に測定したDBB誤差軌跡から読み取ったスティックモーションの大きさを比較したものを図9に示す。送り速度が大きくなるに従って、モータの負荷が小さくなるのにスティックモーションが大きくなるのは、ステップ状の負荷の変化を減衰するのにほぼ同じ時間を要するこ

Fig.10 Generating mechanisms of stick motion and lost motion

と運動方向の変わらないもう一方の軸の送り速度が大きくなることとの兼ねあいによるといえる。また、低速送りではスティックモーション量は、フィードバック位置の遅れとほぼ一致しているが、高速送りになるにつれてフィードバック位置の遅れに比べて大きくなっている。これは、速度を一定に制御するため、Y軸の遅れだけX軸の速度が増加して、X軸方向の誤差を生じ、この誤差が高速送りほど大きくなることが原因であると思われる。この現象は、X、Y両軸の誤差が現れるD B B誤差軌跡上のスティックモーション量には影響するが、Y軸のみのフィードバック位置の遅れには現れない。

以上より、スティックモーションは運動方向反転時のサーボモータの負荷のステップ状の変化に対して、出力トルクの応答が遅れることによる回転角の遅れが主な原因であることがわかる。特に、クローズドループ方式の場合は、送り駆動系の弾性変形の向きが変わることによる位置の誤差も制御によって回復されるので、これに対する応答遅れもスティックモーションに含まれる。そのため、スティックモーション量はセミクローズドループ方式に比べて、一般に大きくなる。

以上の結果からロストモーションとスティックモーションのモデルを立て、円弧補間の象限切換え時に起こる現象をモデル化すると次のようになる。

運動方向反転後、送り駆動系の弾性変形の向きが逆になるまで（すなわちモータトルクの向きが反転するまで）しゅう動体は移動しないが、クローズドループ

方式の場合は、制御ループ内にしゅう動体の位置が含まれているから、図10(a)に示すように、移動後は直ちに指令位置に追いつく。したがって、象限切換え時に起こるのはスティックモーションのみである。

セミクローズドループ方式の場合は同図(b)に示すように、運動方向反転後サーボモータの回転角に遅れが生じるが、これは制御ループ内に含まれているからやがて指令角度に追いつく。しかし、送り駆動系の弾性変形によりしゅう動体はモータのトルクが一定の値に達するまで停止したままで、この間の移動量に相当する距離がロストモーションとなりしゅう動体の移動開始後も残る。また、しゅう動体の移動開始後もなおモータの回転に遅れがあれば、図に示すようにロストモーションとスティックモーションが同時に生じる。

3. スティックモーション補正

3.1 補正法

スティックモーションを減少させるためには、モータの負荷のステップ状の変化に対する制御系の遅れが原因であるので応答性を上げればよいが、あまりループゲインを上げるとハンチングが生じる。そこで、ボールねじが実際に反転するとき、速度ループ内の積分要素の符号を反転させて電機子電流を反転するような操作を行って補正する方法を考案した。具体的には、機械Aにおいて速度ループ内の積分要素をボールねじ反転指令から約21.3ms(可変)後にその一部(可変)を反転させる操作を行った。図11にその理論的に期待されるモータの出力トルクの変化を示す。

3.2 確認実験の結果と考察

図12は図5と同じ運動条件で、スティックモーション補正を一部反転(50%)に設定して測定したエンコーダフィードバックから換算した位置とモータの出力トルクの結果を示す。図5と図12を比較すると、モータの出力トルクの応答が早くなっていることがわかる。しかし、余り大きな操作をするとショックで図12のエンコーダの動きに僅かに見られるようなくぼみを作ることになる。

図13にスティックモーション補正なしとスティックモーション補正ありのD B B測定の結果を示す。なお、スティックモーション補正ありの時には各送り速度に応じたバックラッシュ補正を設定し、反転させる割合は50%に設定した。図より補正を行うことでボールねじ反転時(象限切換え時)に生じていたスティックモーション現象は見られなくなったことがわかる。

しかし、このシステムではボールねじ反転の指令から21.3ms経過後に電機子電流の指令を反転させている

Fig.11 Expected output torque change of the servo motor by stick motion compensation

ために、送り速度が非常に早い場合には積分要素の値がボールねじ反転前の負荷に相当する値から既に変化していることも考えられる。従って、ボールねじ反転指令時の積分要素の値を記録しておき、実際にボールねじが反転する瞬間に先の値を参考に補正を行うほうがより安定した補正を期待できると思われる。

4. 結 論

NC工作機械で円弧補間送りの際に、象限切換え時に問題となるスティックモーションとロストモーションに関して、これらの原因をDBB法によって測定したしゅう動体の動きとNCの各種の内部データのフィードバック値とを比較し考察した結果、次のことがわかった。

- (1) ロストモーションの原因は、しゅう動抵抗による送り駆動系の構成要素であるボールねじ等の弾性変形が運動方向反転時に向きを変えるまでしゅう動体が駆動されず、その情報が制御系にフィードバックされないことである。ロストモーション量は運動方向反転直前のサーボモータの出力トルクと直線的な関係がある。
- (2) スティックモーションの原因は運動方向反転時の制御系の応答遅れである。クローズドループ制御方式の場合には、位置制御系にしゅう動体の位置も含まれるため、それに加えてしゅう動抵抗に

Fig.12 Output torque change of the servo motor and position of the slider at X(-)

Fig.13 Motion error traces obtained by DBB test

よる送り駆動系の弾性変形によってもスティックモーションが生じる。

また、スティックモーション補正の一方法として、実際にボールねじが反転するのとほぼ同時に、速度ループ内の積分要素の符号を反転させることによって、モータの指令電流を負荷の変化とほぼ等価に変化させる方法を試みた結果、スティックモーションをかなり小さくできることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 垣野義昭ほか: NC工作機械の運動精度に関する研究(第2報), 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1985) 807.
- 2) 二見 茂ほか: 2軸スライド機構におけるクーロン摩擦力に起因する真円形状誤差の一改善法, 昭和61年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集(1986) 715.
- 3) 垣野義昭ほか: NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報), 精密工学会誌, 52, 7(1986) 1193.
- 4) 前田 豊ほか: 高精度完全デジタルサーボシステムの開発, 精密工学会誌, 54, 6(1988) 1057.
- 5) 杉本英彦ほか: 全デジタル・ソフトウェアACサーボ, 三菱電機技報, 58, 12(1984) 856.