

【研究紹介】

数値制御工作機械の高精度化と高度利用技術に関する研究

佐藤 隆太^{1*}

¹ 工学研究科機械工学専攻

(受付: January 30, 2016 受理: March 3, 2016 公開: April 4, 2016)

キーワード: 数値制御工作機械, 送り駆動系, 運動精度, 同期精度, 幾何誤差

1. 緒 言

数値制御工作機械は、自動車用部品、航空機用部品、IT製品の部品、プレスおよび成型用金型などを加工するために必要不可欠な生産財であり、機械を作る機械、マザーマシンとも呼ばれる。工作機械では、工具と工作物間の相対位置または角度を連続的に変化させ、その運動を工作物に転写することで所望の形状を創成する。この運動は創成運動と呼ばれる。とくに、その創成運動が数値制御装置によって制御される工作機械は数値制御 (Numerical Control, NC) 工作機械と呼ばれ、第二次世界大戦後に米国海軍の依頼によりMITで開発されたものが最初である。現在では、日本で生産される工作機械の実に90%以上が数値制御工作機械となっている¹⁾。

工作機械の運動が工作物に転写されることを「母性原理」と呼び、加工に用いた工作機械の精度がそのまま製品に転写される。よって、工作機械の精度以上の精度を有する製品はつくることができないことになる。なお、例えば電動工具のように作業者が工具または工作物のどちらか一方を手によって使用するものは、加工後の製品の形状が母性原理に従わないため、工作機械とは呼ばれない。

工作機械を構成する部品そのものも工作機械により加工されるのであって、より高精度な加工を実現するためには、工作機械を構成する部品の精度を超える精度の創成運動が必要となる。このために、母性原理に基づく工作機械が登場して以来、工作機械の運動精度を測定して補正することにより、部品精度以上の精度をもつ創成運動が実現され、今日の高度に発達した社会を支える製品群の実現に貢献してきた。

例えば、情報化社会を支えるコンピュータやスマートフォンなどの部品の加工を考えても、記録装置の高速化・高

密度化や、コネクタ類の小形化、そしてその低価格化のためには、より高精度な加工をより早く行う必要がある。これには工作機械技術の高度化が欠かせない。自動車や航空機の高性能化および信頼性の向上のためにも、その部品の加工精度の向上が必須である。

ここでは、筆者が大学と民間企業での勤務を通じて取組んできた数値制御工作機械の高精度化と高度利用技術に関する研究について、その概要を紹介する。

2. 数値制御工作機械における形状創成

数値制御工作機械の構成要素を運動制御技術の視点からみると、図1のようになる¹²⁾。CAD/CAMソフトウェア等により作成したNCプログラムを数値制御装置に入力すると、数値制御装置ではそのNCプログラムを解析し、機械を構成する各軸を駆動するモータの位置または角度指令を生成する。各軸のモータを駆動するサーボドライバは、送られてきた指令にできる限り忠実にモータを駆動し、複数の送り軸が幾何学的に組み合わせられた機械本体を介して、最終的に工具と工作物との間に所望の形状が創成される。

このとき、多軸・複合加工機におけるNCプログラムは微小線分によるものであることが多く、曲線を微小線分で近似することによる誤差が内在している。さらに、各軸を駆動するサーボ系においても、指令に対する追従遅れや摩擦や切削力といった外乱による誤差が生じる。機械本体には、例えば回転軸中心線のオフセットや傾き、直進軸の真直度や軸間の直角度といった「幾何誤差」が存在するほか、熱変形や振動といった様々な誤差要因が存在する。

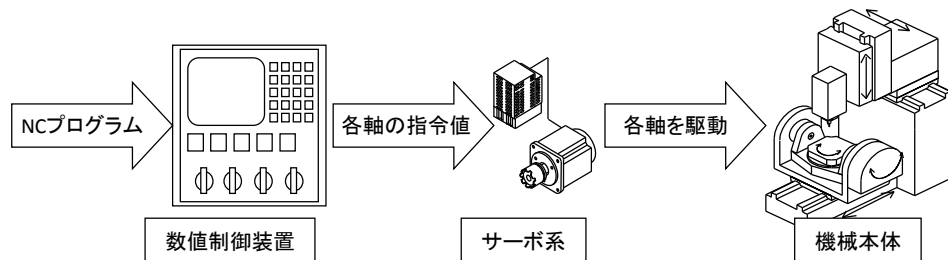


Fig. 1 Shape generation process in the NC machine tools

3. 送り駆動系のモデル化と高精度化

3.1 送り駆動系シミュレータ

送り駆動系はACサーボモータ、ボールねじおよび案内機構などからなる送り駆動機構と制御系とを合わせたものであり、数値制御工作機械における形状創成を支配している。送り駆動系により工作機械を構成する送り軸が駆動され、その運動軌跡はそのまま製品に転写されることから、その運動性能の向上が重要な課題である。送り駆動系は機械系、電気系、および制御系が融合したメカトロニクスシステムであり、その運動性能の向上のためにはシミュレーションによる検討が有効である。そこで、送り駆動系の挙動を的確に表現するための数学モデルを開発した⁴⁾。

モータトルクの飽和特性、機構の内部減衰、各摺動部における粘性および摩擦力を考慮した数学モデルと、各パラメータの決定方法について提案し、ステップ応答、周波数応答、円運動およびコーナ部運動の実験とシミュレーションとを行った結果、提案したモデルにより電気系と機械系の特性を総合的に解析することができ、様々な運動をひとつのモデルで正確にシミュレーションできることが確認された。開発した数学モデルおよびパラメータ同定方法は、「送り駆動系シミュレータ」と称したソフトウェア(図2)としてまとめられた⁵⁾。

これらの研究に関して、マザック財団論文賞および国際工作機械技術者会議優秀ポスター賞を受賞した。

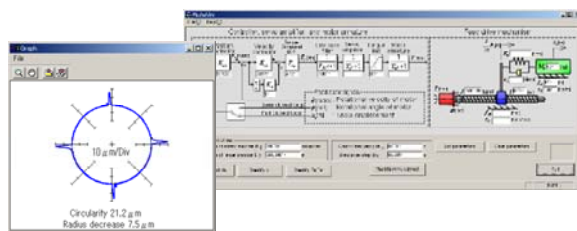


Fig. 2 Feed drive simulator⁵⁾

3.2 摩擦により生じる象限突起の解析と補正

工具と工作物との間に円運動を創成する場合には、直進軸2軸を同期制御する必要がある。このとき、円弧の象限切替え部においてはどちらか一方の軸の運動方向が反転することとなり、突起状の軌跡誤差(象限突起)が生じることが知られている。象限突起の原因は軸受やボールねじ-ナット間、および直動案内内部に存在する摩擦であり現象の解明と補正に関する多くの研究が行われてきたが、その現象が正しく理解されているとはいえなかった。

そこで筆者らは、円運動時に生じる象限突起の生成過程を解明するために、サーボ加速度計を使用して円運動時の軸の加速度を測定し、微小変位領域における非線形摩擦特性を詳細にモデル化することで、運動方向反転時の挙動について実験とシミュレーションとを行った。さらに、その結果に基づいて象限突起の生成過程を解明した⁶⁾。

円弧軌跡の測定結果とシミュレーション結果の例を図3に示す。図は、半径方向の誤差を1000倍に拡大して表示している。図からわかるように、各象限切り替え後に突起状の軌跡誤差が生じており、その現象をシミュレーションに

より表現できている。

この成果をもとに象限突起補正方法も開発され、円運動の半径や送り速度によらずに象限突起を補正することに成功した⁷⁾⁸⁾。象限突起の補正を行った場合と行わなかった場合の比較を図4に示す。さらに、この成果を発展させて様々な状況に対応した補正機能が開発された⁹⁾¹⁰⁾。

これらの研究に関して、精密工学会論文賞、精密工学会沼田記念論文賞、マザック財団論文賞、工作機械技術振興賞(奨励賞)、工作機械技術振興賞(論文賞)、およびフアナックFAロボット財団論文賞を受賞した。

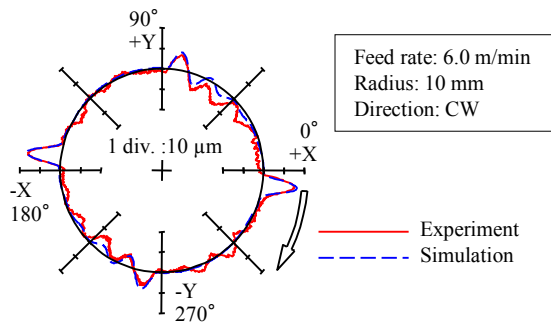


Fig. 3 Measured and simulated circular trajectories⁶⁾

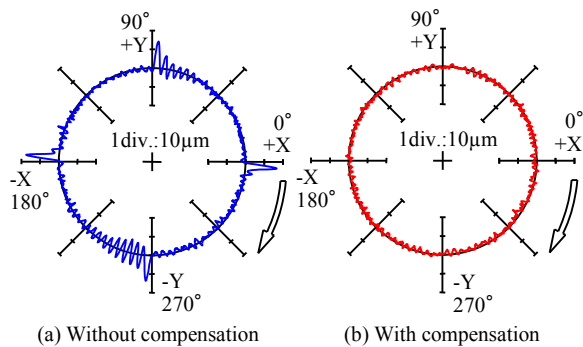


Fig. 4 Comparison of circular trajectories⁷⁾
(Feed rate: 3000 mm/min, Radius: 25 mm)

3.3 直進軸と回転軸の動的同期精度

直進軸に加えて回転軸を有する5軸制御マシニングセンタでタービンブレードやインペラのような複雑な形状を加工する際の同期運動精度が加工精度に大きな影響を及ぼすと予測された。さらに、旋回軸を含む同時多軸制御運動では、工具-工作物間の相対速度を一定に保とうとすると、各軸の速度は激しく変動するため、動的な同期精度がより重要になると考えられたが、直進軸と回転軸の動的な同期精度に関する研究例はみあたらなかった。

そこで筆者らは、直進軸と旋回軸の送り駆動系を動的なモデルで表現し、旋回軸を含む同時多軸制御運動のシミュレーションを行うことで、直進軸と旋回軸の動的な同期精度に影響を及ぼす因子を検討した。その結果、フィードフォワード制御を使うことで同時多軸制御運動時の同期精度

を大幅に向上できること、回転軸を含む同時多軸制御運動では、速度ループの特性が同期精度に大きな影響を及ぼし、同期精度の向上のためにはすべての軸の速度ループゲインを一致させる必要があることなどを明らかにすることができた^{11) 12)}。得られた知見に基づいて、同期制御精度を向上するためのサーボゲイン調整方法や各種補正方法を開発し、多軸制御工作機械の高性能化のための方法を確立した^{13) 15)}。

タービンブレードの加工方法およびそのときの各軸の速度変化を図5に示す。図に示すように、とくに曲率半径の小さい翼端部分において各軸の速度が急激に変化している。このことが原因で、図6に示すように、翼端部分では大きな加工誤差が生じることになる。しかし、筆者らが得た知見に基づいて制御系を設定することで、その加工誤差を大幅に小さくすることができる。

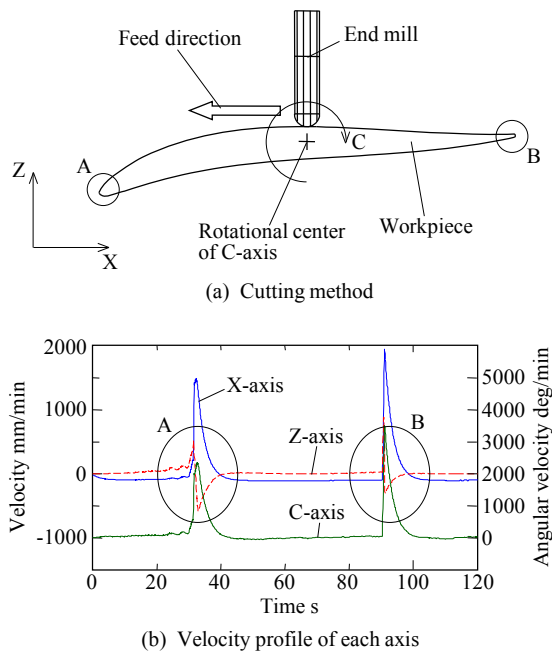


Fig. 5 Turbine blade cutting by a 5-axis machining center

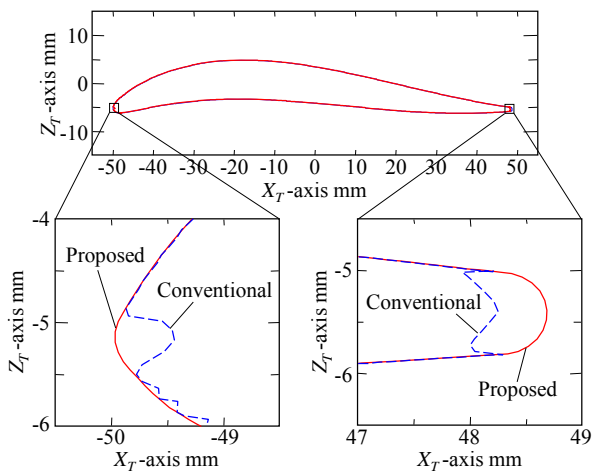


Fig. 6 Effect of proposed controller on turbine blade cutting¹¹⁾

これらの研究により得られた知見は、その後の研究における解析で大きな意味をもつこととなり^{16) 18)}、数値制御工作機械の精度評価方法に関するISO規格¹⁹⁾の制定において重要な役割を果たした。

4. 幾何誤差の測定と補正

送り駆動系の性能が向上して高精度な運動が実現されたとしても、各送り軸の案内面の精度や軸間の直角度やオフセットといった幾何誤差の影響により、工具と工作物間には位置および姿勢誤差が生じることになる。各送り軸はそれぞれ並進3自由度と回転3自由度の合計6自由度の誤差を有しており、軸の幾何学的な関係により工具-工作物間の位置および姿勢に影響を及ぼす。その様子を模式的に表したものを図7に引用する。筆者らは、それら幾何誤差の影響について測定して補正するための方法を開発している^{20) 23)}。

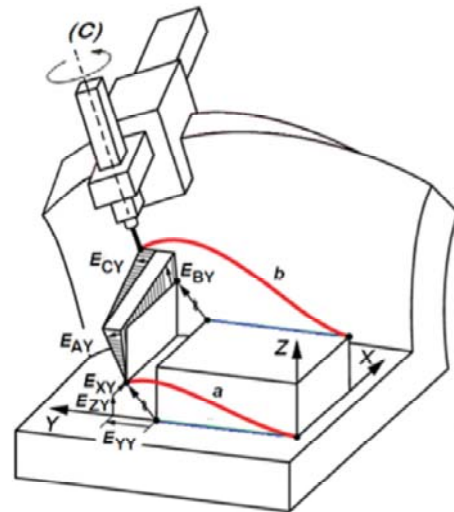


Fig. 7 Machining center with error motions¹⁹⁾

5. 結 言

数値制御工作機械の高精度化に関する一連の研究について高くご評価いただき、2015年度の文部科学大臣表彰若手科学者賞としてご表彰頂いた。これらの研究成果は多くの共同研究者との協力による成果となし得たものであり、この場をお借りして深く感謝申し上げます。

高精度化とあわせて高度利用技術に関する研究も進めており、例えば運動誤差の特性と工具経路との関係で運動誤差が製品に転写されない場合があることが明らかとなっている^{24) 28)}。さらに、送り駆動系の消費電力モデルに基づいて消費エネルギーの解析を行うことで、消費エネルギーを最小にする工具経路を生成できる可能性があることも明らかとなった^{29) 31)}。

工作機械関係の技術力はその国の工業力を表すともいわれ、全ての産業競争力の基盤となるものであるといっても

過言ではない。未来へ向けたよりよい社会の実現のため、より一層の精進を重ねる覚悟であり、皆様のご指導ご鞭撻をよろしくお願い申し上げます。

References

- 1) 一般社団法人日本工作機械工業会ホームページ, <http://www.jmtba.or.jp/>, (2016.1.30 アクセス).
- 2) 佐藤隆太, 連載 多軸・複合加工機の課題と今後をさぐるー精度を評価し維持するための技術 第4回 多軸・複合加工機の制御技術, 機械技術, 第61巻7号, 68-72, (2013).
- 3) 佐藤隆太, 連載 多軸・複合加工機の課題と今後をさぐるー精度を評価し維持するための技術 第5回 多軸・複合加工機のシミュレーション技術, 機械技術, 第61巻8号, 72-76, (2013).
- 4) 佐藤隆太, 堤正臣, ACサーボモータと直動転がり案内を用いた送り駆動系の数学モデル, 精密工学会誌, 71, 5, 633-638, (2005).
- 5) R. Sato, Feed Drive Simulator, International Journal of Automation Technology, 5, 6, 875-882, (2011).
- 6) 佐藤隆太, 堤正臣, 長島一男, 円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動, 精密工学会誌, 72, 2, 208-213, (2006).
- 7) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣, 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器, 精密工学会誌, 74, 6, 622-626, (2008).
- 8) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣, 摩擦補償方法, 摩擦補償器及びモータ制御装置, 特許第4581096号, (2007).
- 9) 樋口拓郎, 真鍋佳樹, 佐藤隆太, 堤正臣, NC工作機械の運動精度向上に関する研究 -トルク変化に対応する自律形象限突起補償器の開発-, 精密工学会誌, 76, 5, 535-540, (2010).
- 10) 樋口拓郎, 国貞宏通, 国井嘉仁, 佐藤隆太, 堤正臣, マシニングセンタの円弧補間運動における二山象限突起の補正, 日本機械学会論文集(C編), 78, 788, 1211-1220, (2012).
- 11) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣, 5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と回転軸の動的同期精度, 精密工学会誌, 72, 1, 73-78, (2006).
- 12) 弓座大輔, 内海敬三, 堤正臣, 佐藤隆太, 5軸制御マシニングセンタの同期運動精度測定方法, 日本機械学会論文集(C編), 72, 723, 3672-3678, (2006).
- 13) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣, 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, 日本機械学会論文集(C編), 73, 727, 693-700, (2007).
- 14) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣, サーボゲイン算出方法, サーボゲイン算出プログラム及びサーボゲイン算出装置, 特許第4576530号, (2005).
- 15) 佐藤隆太, 遠藤大介, 堤正臣, 同時多軸制御運動における回転軸の高性能運動制御, 日本機械学会論文集(C編), 74, 737, 60-67, (2008).
- 16) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏, 円すい台加工を模擬した5軸制御マシニングセンタの3次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会論文集(C編), 78, 787, 964-975, (2012).
- 17) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 井原之敏, 5軸制御マシニングセンタによる円すい台加工と等価な3次元円弧補間運動のボールバー測定における感度解析, 日本機械学会論文集(C編), 78, 791, 2677-2688, (2012).
- 18) N. Kato, M. Tsutsumi and R. Sato, Analysis of Circular Trajectory Equivalent to Cone-frustum Milling in Five-axis Machining Centers using Motion Simulator, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 64, 1-11, (2013).
- 19) ISO 230-1, Test code for machine tools -Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, (2012).
- 20) 佐藤隆太, 小野俊郎, 中村直樹, 藤野大助, 数値制御装置, 特許第5105024号, (2010).
- 21) 佐藤隆太, 井内幸弘, 小野俊郎, 誤差測定装置及び誤差測定方法, 特許第4959028号, (2011).
- 22) 佐藤隆太, 長岡弘太郎, 小野俊郎, 誤差表示装置及び誤差表示方法, 特許第5014525号, (2011).
- 23) M. Tsutsumi, S. Tone, N. Kato and R. Sato, Enhancement of Geometric Accuracy of Five-axis Machining Centers based on Identification and Compensation of Geometric Deviations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 68, 11-20, (2013).
- 24) K. Nishio, R. Sato and K. Shirase, Influence of Motion Errors of Feed Drive Systems on Machined Surface, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 6, 6, 781-791, (2012).
- 25) 西尾健太郎, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 同時5軸制御による円すい台加工面の解析, 日本機械学会論文集(C編), 79, 808, 4613-4623, (2013).
- 26) Y. Sato, R. Sato and K. Shirase, Influence of Motion Error of Feed Drive Systems onto Machined Surface Generated by Ball End Mill, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 8, 4, No.14-00085, (2014).
- 27) R. Sato, Y. Sato, K. Shirase, G. Campatelli and A. Schippa, Finished Surface Simulation Method to Predicting the Effects of Machine Tool Motion Errors, International Journal of Automation Technology, 6, 8, 801-810, (2014).
- 28) 運動誤差をカバーする加工法, 生産財マーケティング2013年10月号, A-146, (2013).
- 29) 林晃生, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定と評価, 精密工学会誌, 79, 10, 930-936, (2013).
- 30) 林晃生, 井上雄太, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 数値制御工作機械送り駆動系の消費エネルギーに基づく工具経路評価, 精密工学会誌, 80, 7, 699-704, (2014).
- 31) 消費電力量を抑えるツールパス, 生産財マーケティング2015年5月号, A-48, (2015).