

# NC制御機能開発における シミュレーション技術の活用

長岡弘太郎\*

*Applying of Simulation Technology to Development of Control Function for NC System*

Kotaro Nagaoka

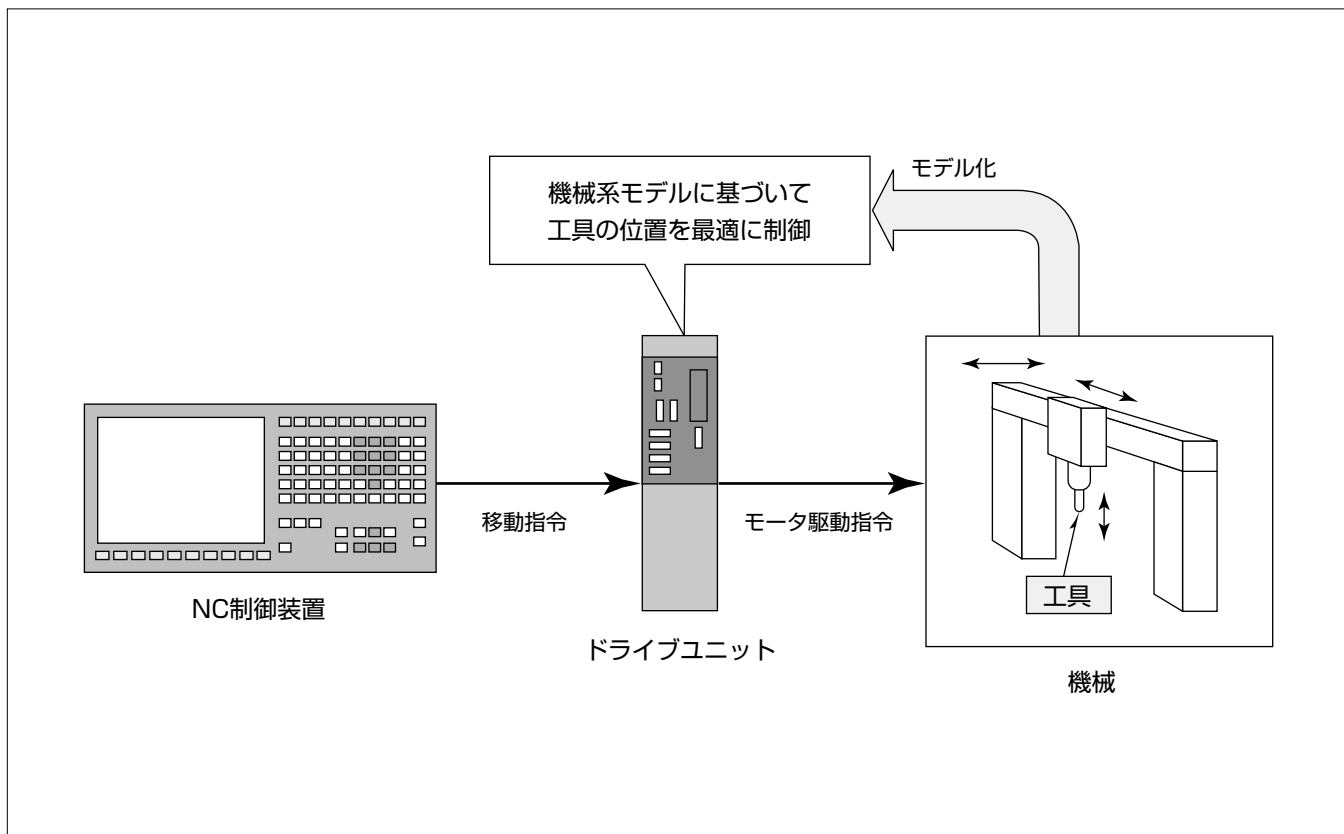
## 要 旨

NC(Numerical Control)工作機械は、各種金型や金属部品などを高い精度で加工するための重要な生産財である。高精度な加工は、加工対象物に対する工具の経路(工具軌跡)を指令された経路に正確に追従させる制御(サーボ制御)によって実現される。サーボ制御は、NC制御装置で生成された移動指令に工具が正確に追従するように、ドライブユニット内で行われる。

近年、加工に要する時間を短縮して高い生産性を実現するために、機械の高速な駆動が求められている。一方で、機械を高速に駆動させようとする、工具を指令された経路に正確に追従させることが難しくなるという問題がある。高速に駆動させる場合、移動指令の変化が激しくなり、その激しい移動指令の変化に素早く反応させるように制御し

ようすると、機械を不必要に揺らしてしまう。その揺れ(機械振動)の影響によって工具軌跡が指令された経路からずれてしまい、結果として加工の精度が低下してしまう。

そこで、機械振動を抑制し、高い精度で工具を移動指令に追従させるために、OMR-FF(Optimum Machine Response-Feed Forward)制御方式を開発した。この方式は、機械振動をモデル化し、モデルに基づいた制御を行って高精度な加工を実現するものである。開発にあたり、シミュレーションによって求めた工具軌跡を定性的・定量的に分析することで、開発の効率化を図った。シミュレーションによって、従来よりも振動抑制性能が向上することが確認でき、さらに、最適な制御パラメータを探索することが可能となる。



## NC工作機械の装置構成とOMR-FF制御

工具軌跡に影響を及ぼす機械振動をモデル化し、モデルに基づく最適な制御を行うことによって、機械振動を抑制して高精度な加工を実現する。

## 1. ま え が き

生産性向上の要求に対応するため、NC工作機械のサーボ制御では、高速・高加速度の条件下でも機械の工具軌跡が指令された経路に誤差なく追従することが求められる。追従誤差を小さくするためにサーボ制御のハイゲイン化（応答を速くすること）が図られているが、単に応答を速くして高速条件で駆動すると、機械振動が生じ、工具軌跡に誤差が生じてしまうという問題があった。さらに、サーボ制御に用いる位置検出器は、通常は工具とは離れた位置に設置されており、位置検出器が設置された位置から工具までの間の機械要素が振動しやすい場合、位置検出器で検出される位置（フィードバック位置）を指令された位置に正確に追従させても、工具軌跡は機械振動の影響を受けて指令経路からずれてしまうという問題があった。

そこで、機械振動を抑制するためのサーボ制御方式を開発した。開発に当たっては、工具軌跡をシミュレーションによって求めることによって、誤差抑制効果の確認や、最適パラメータの探索を行い、開発の効率化を図った。

本稿では、開発した制御方式の特長と、シミュレーションによる効果確認及び実機測定結果との比較について述べる。

## 2. 機械系のモデルに基づいた制御

### 2.1 振動抑制制御の課題

機械振動を制御によって抑制する場合、振動の周波数が既知であれば、フィードフォワード制御（想定される誤差に基づいてあらかじめ指令信号を操作する制御）が有効である。指令信号から機械振動の周波数成分を取り除くことで、機械振動を抑制することができる。また、フィードフォワード制御には、どのようなパラメータを設定しても制御系が不安定になることがないという利点がある。

工作機械のサーボ制御では、振動の抑制を簡単な構成で行う方式として、指令ノッチフィルタ（指令信号に含まれる特定周波数の振動成分を除去するフィルタ）を用いる方式が従来から用いられている。しかしこの方式では、工具軌跡に生じる誤差を十分に抑制できない場合がある。そこで、新しい制御方式として、OMR-FF制御を開発した。この制御方式は、当社汎用サーボで定評のある“規範モデルを利用した2自由度制御”<sup>(1)</sup>に、機械の振動特性に応じたフィードフォワード制御を付加した方式である<sup>(2)</sup>。

### 2.2 機械系のモデル化

OMR-FF制御は、機械の特性に応じて工具軌跡が指令経路どおりに最適に動くように制御するものである。そのためには、機械系の特性を適切にモデル化することが必要となる。図1は、機械系モデル化の概念を示すイメージ図である。機械系は一般にモータ駆動指令を受けて駆動トルクを発生させるサーボモータ、実際に位置を制御する対象

である工具と、サーボモータの駆動トルクを工具まで伝達する動力伝達機構（ボールねじなど）から構成される。さらに、制御系にフィードバックするための位置を検出する位置検出器を持っている。図1に示す例では、サーボモータの回転角度からフィードバック位置を求めている。

一方、実際に制御したいのは工具の位置であるが、工作機械で加工中にこの位置を直接測ることは現実的には不可能である。長さを測定できる位置検出器（リニアスケール）を用いて、より工具に近いところの位置を測る方法もあるが、その場合も工具とは離れたところに位置検出器を配置することになる。

したがって、機械系を2つに分けてモデル化する。すなわち、モータ駆動指令とフィードバック位置の間のモデルを機械モデル1とし、フィードバック位置と工具位置の間のモデルを機械モデル2としてそれぞれモデル化する。フィードバック位置と工具位置との間の特性としては、数百rad/s程度の比較的低い周波数で振動する特性が見られる場合が多い。

### 2.3 OMR-FF制御方式

OMR-FF制御方式の構成を図2に示す。この制御系はフィードバック制御部とフィードフォワード制御部からなり、フィードフォワード制御部は規範モデルと位置・速度・トルクの各FF（フィードフォワード）演算を含む。規範モデルは、指令位置に対する工具位置の応答の速さを決定するためのもので、その応答の速さを規範モデルのゲインで規定する。

従来制御の場合は応答の速さはフィードバック制御部のパラメータや機械系の特性の影響を受けてしまうが、OMR-FF制御ではそれらに無関係に工具位置の応答の速さを決定できるので、工具位置の応答が所望の応答となるように容易に制御することができる。ただし、規範モデルのゲインを大きい値に設定すれば速い応答が得られるが、

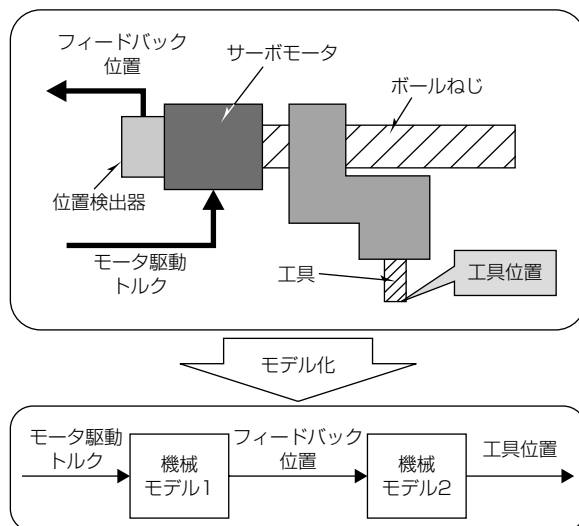


図1. 機械系のモデル化

工具端を急峻(きゅうしゅん)に動かすことになるため、振動が生じやすくなる。また、対称な形の信号が入力された場合には、対称な形の信号が出力されるように規範モデルを設計することによって、対称性のよい工具軌跡を得ることができる。

一方、位置・速度・トルクの各FF演算は、機械系のモデルに基づいて行われる。位置のフィードフォワード演算は、フィードバック位置から工具位置までのモデル(機械モデル2)の逆特性の演算を行う。速度のフィードフォワード演算は、機械モデル2の逆特性の演算を行った上で、位置を速度に換算する演算を行う。トルクのフィードフォワード演算は、モータ駆動トルクから工具位置までのモデル(機械モデル1と機械モデル2を結合したモデル)の逆特性の演算を行う。このように設計することで、機械の振動特性がキャンセルされ、工具位置は規範モデルの出力と一致して動作することになる。

### 3. 軌跡シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション条件

従来制御方式とOMR-FF制御方式のそれぞれについて、パラメータと制御性能の関係を明らかにし、さらに両制御方式の制御性能の比較を行うために、軌跡シミュレーションを行う。

シミュレーションに用いる機械系は、周波数が200rad/s及び400rad/sの2つの振動モードをもつ3慣性系とする。シミュレーションに用いた機械系モデルの周波数応答を図3に示す。図3で、破線はモータ駆動指令から検出器位置までの周波数応答、実線はモータ駆動指令から工具位置までの周波数応答をそれぞれ示している。

シミュレーションに用いた指令経路は、送り速度5

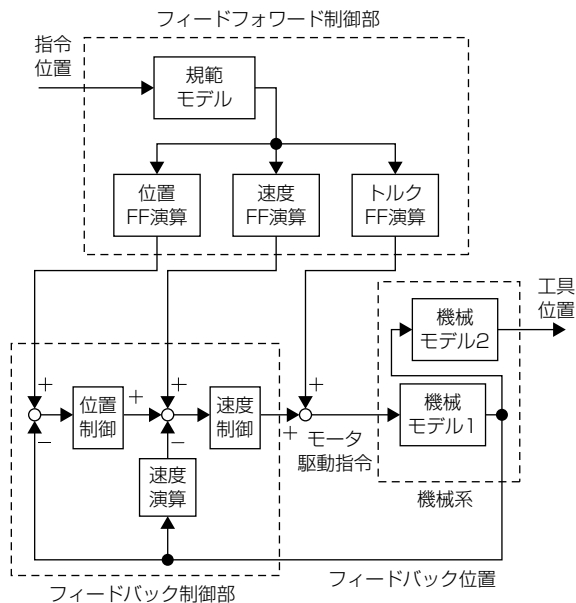


図2. OMR-FF制御の構成

mm/s、角度90°のコーナー形状とした。従来制御方式の場合、ノッチフィルタのパラメータを機械系の200rad/sの振動モードに合わせて設定した。また従来制御では、フィードフォワードの効き具合を、フィードフォワード率(FF率)を用いて調整する。このシミュレーションでは、FF率を0.70から1.0まで変化させた。また、OMR-FF制御方式の場合、位置・速度・トルクのフィードフォワード演算のパラメータは機械系の200rad/sの振動モードに合わせて設定し、規範モデルのゲインを30rad/sから55rad/sまで変化させた場合についてシミュレーションを行った。

性能の評価には、コーナー追従誤差(指令コーナーの角の二等分線と軌跡との交点と、指令コーナー頂点との距離)とコーナー振動振幅(コーナー通過後の工具軌跡の指令経路に垂直な方向の振動振幅)を用いることとした。

#### 3.2 シミュレーション結果

従来制御及びOMR-FF制御それぞれのシミュレーション結果について、コーナー振動振幅を横軸にとり、コーナー追従誤差を縦軸にとってプロットしたものを図4に示す。FF率またはゲインを大きく設定すると、コーナー追従誤

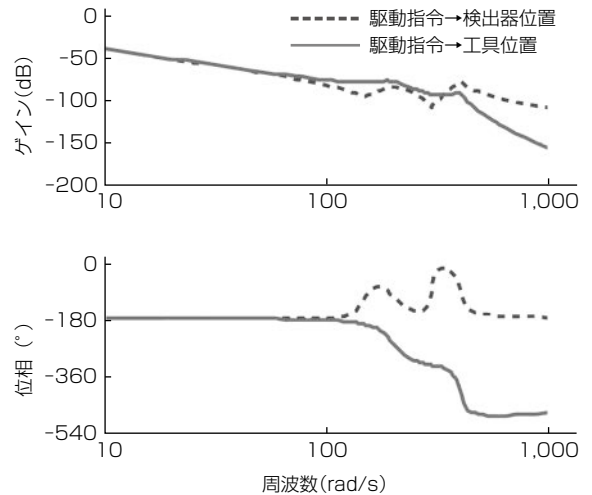


図3. シミュレーション用機械モデルの周波数応答

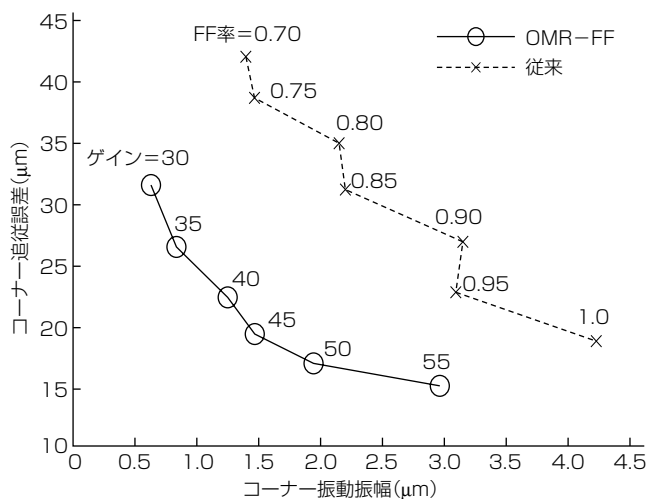


図4. シミュレーション結果

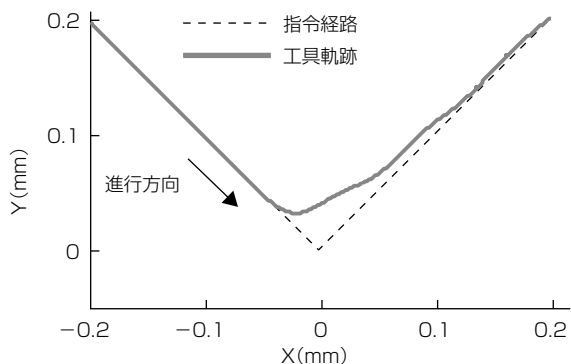


図5. 軌跡シミュレーション結果(従来制御)

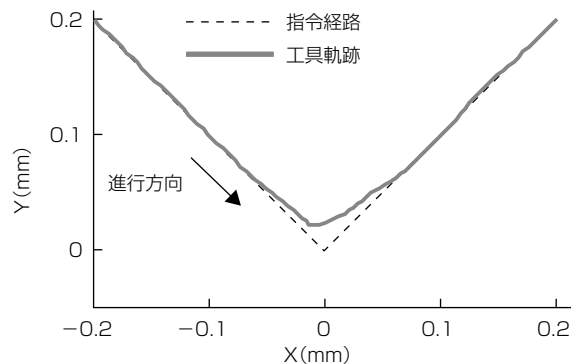


図7. 軌跡測定結果(従来制御)

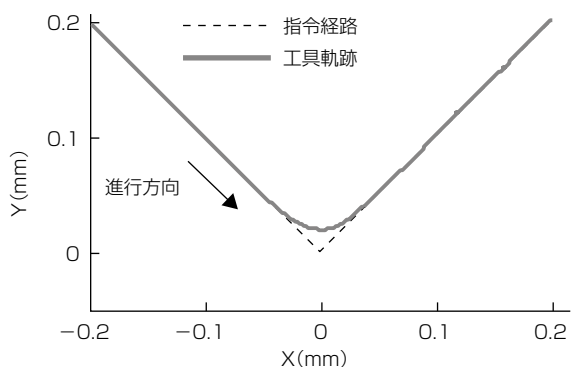


図6. 軌跡シミュレーション結果(OMR-FF制御)

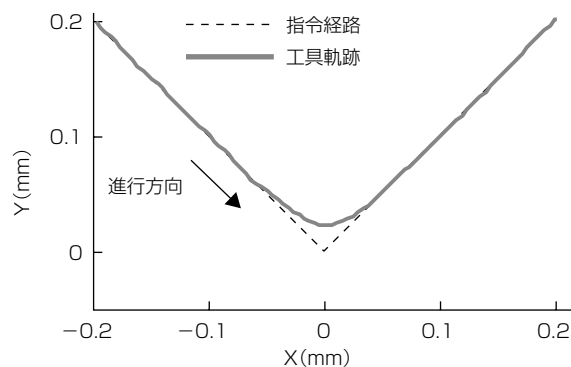


図8. 軌跡測定結果(OMR-FF制御)

差は小さくなるが、コーナー振動振幅が大きくなる。

同一のコーナー振動振幅で比較した場合、OMR-FF制御は従来制御に比べてコーナー追従誤差を約1/2にできる。例えば、コーナー振動振幅を1.5 $\mu\text{m}$ 以内に抑えるための従来制御のFF率は0.75であるが、そのときのコーナー追従誤差は38 $\mu\text{m}$ である。一方、OMR-FF制御では、規範モデルゲインを45rad/sとすればコーナー振動振幅を1.5 $\mu\text{m}$ 以下とできるが、そのときのコーナー追従誤差は従来制御時の1/2の19 $\mu\text{m}$ となっている。

従来制御でFF率を0.75に設定した場合とOMR-FF制御で規範モデルゲインを45rad/sに設定した場合のコーナー通過時の軌跡を、図5及び図6にそれぞれ示す。OMR-FF制御の場合の方が工具軌跡の形状が対称でひずみの少ないものとなり、良好な制御特性が得られることが分かる。

#### 4. 実機測定結果

シミュレーションモデルの妥当性及び実際の制御性能の確認のため、実機を用いた軌跡測定実験を行った。実験は、工具のX軸及びY軸の2軸の位置をNC制御装置を用いて制御し、そのときの工具軌跡を二次元エンコーダ<sup>(3)</sup>を用いて測定することによって行った。NC制御装置は三菱電機製“M750”及び“MDS-Dサーボドライブ”を用いた。

従来制御を用いた場合の測定結果を図7に、OMR-FF制御を用いた場合の測定結果を図8にそれぞれ示す。

各方式における制御パラメータは、シミュレーションと

同じものを設定している。工具軌跡の形状に現れる傾向としては、シミュレーション結果と実験結果はおおむね一致している。また、OMR-FF制御の方が軌跡の対称性が良い結果となっていることが分かる。

#### 5. むすび

NC工作機械の送り制御系で、機械系のモデルに基づいて工具軌跡を最適に制御するための制御方式としてOMR-FF制御を開発した。従来の指令ノッチフィルタを用いる方式に対して、規範モデルを用いた2自由度制御方式に機械振動モデルに基づくフィードフォワードを付加した方式であるOMR-FF制御方式を適用することによって、軌跡の追従性・振動抑制性能・対称性が向上することを示した。

#### 参考文献

- (1) 小山正人, ほか: 規範モデルを用いた電動機の2自由度制御, 電気学会論文誌D, **114**, No2, 137~143 (1994)
- (2) Nagaoka, K.: Control Method of Motion Error Compensation for NC Machine Tools, Intl. J. of Automation Technology, **3**, No.3, 292~297 (2009)
- (3) Measuring systems for inspecting linear axes-KGM181 and KGM182 grid encoders, Measuring systems for machine tool inspection and acceptance testing(The brochure of the Heidenhain), 10~11 (2007)