多自由度機械の群機械モデリング

九工大　林　朗弘，有明高専　原槙真也，沼津高専　佐竹利文，九工大　横関俊介

要　旨

ユニット機械が多数集まり大局的な目的へ向かって自律的に振舞うような機械システムは群機械と考えることができる．一方で，駆動軸をユニット機械と見なせば，工作機械やロボットなども群機械と考えることができる．本研究では，多軸工作機械などの多自由度機械の軌道制御システムを群機械という考え方を用いてモデル化した．また，群機械という考え方を軌道制御システムに適用した場合の期待される効果について検討した．

1．はじめに

人が機械と見ることのできるユニットが多数集まり大局的な目的に向かって自律的に振舞うようなシステムは群機械と考えることができるであろう．事実，群機械というキーワードに対して，多数の自律ユニットからなる機械システムや複数ＡＧＶの協調作業などの研究[1]がこれまで報告されてきた．一方で，駆動軸をユニット機械と見なせば，工作機械やロボットなどもまた群機械と考えることができる．著者らは，切削工具の軌道制御システムの実現を目的に，多軸工作機械を群機械と見なした多軸軌道制御システムの提案と検討をこれまでおこなってきた[2]．軸指令の生成や軌道制御において工作機械などを群機械と見なす考え方には幾つかの利点がある．本稿では，多軸工作機械の軌道制御に群機械という考え方を用いたシステムモデルを示し，それにより期待される効果について述べる．

2．多軸軌道制御における問題

姿勢変化を含む工具の軌道を工作物座標系でＮＣプログラム化し制御装置に入力しても多軸工作機械では目標の軌道どおりに工具は動かず軌道誤差が発生する．例えば，一般的な３軸工作機械に回転駆動軸であるＢ軸を取り付けた簡単な構造の４軸工作機械を考えてみる．Ｂ軸を回転させれば工具の姿勢を変えることができる．しかし，図１に見るように，Ｂ軸の動きはＸ－Ｚ平面上に余分な円弧軌道を同時に発生する．その結果，目標の工具軌道から実際の軌道は外れてしまう．これが軌道誤差の原因である．

従来からある軌道制御のように，分配された指令に基づいて各駆動軸を動かし，その重ね合わせの結果として目標の軌道を得る方法では多軸工作機械の軌道誤差をなくすことはできない．なぜなら，多軸工作機械では一部の駆動軸の動きが他の軸の動きと干渉する場合があるからである．そのため，多軸工作機械の場合，駆動軸の動きを調整しながら適切に軸指令を分配する軌道制御が必要になる．

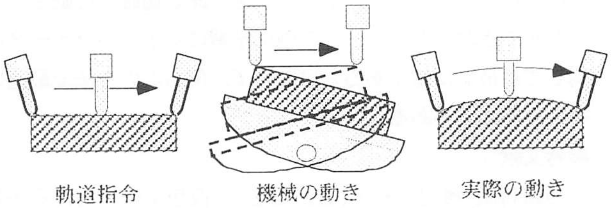

図１　多軸加工における工具軌道

3．工作機械の群機械モデリング

制御サンプリング時間ごとの工具軌道の偏差ベクトルをΔXとする．また，ΔXに対応する駆動軸の指令ベクトルをΔMとする．ΔXからΔMの変換を$[T_1]$，機械の構造を$[T_3]$と書くと，機械の軌道制御は次のように考えることができる．

$$\Delta X \Rightarrow [T_1] \Rightarrow \Delta M \Rightarrow [T_3] \Rightarrow \Delta X' \quad (1)$$

ここで$\Delta X'$は実際の工具軌道である．軌道制御は$\Delta X - \Delta X' = 0$となるΔMを決める問題である．$[T_1]$と$[T_3]$は運道学的な逆変換と順変換の関係になる．

多軸工作機械ではΔXとΔMの次元が一般に異なる．また工具軌道に各駆動軸の動きが干渉し合う．その影響は，機械の構造やその時の状態によって異なる．これらの理由から機械がどのような状態にあっても成り立つ$[T_1]$と$[T_3]$の関係を厳密に定式化するのは多軸工作機械では難しい．

このような点を考え，本研究では，駆動軸の干渉を相互に補償する$[T_2]$を付加した軌道制御システムを提案する．$[T_2]$が変換した補正後の駆動軸ベクトル$\Delta M'$によって機械は動作する．$[T_2]$は駆動軸をユニット機械と見なした一種の協調／適応システムである．$[T_2]$を加えた軌道制御の流れは次のようになる．

$$\Delta X \Rightarrow [T_1] \Rightarrow \Delta M \Rightarrow [T_2] \Rightarrow \Delta M' \Rightarrow [T_3] \Rightarrow \Delta X'$$
$$\Delta X - \Delta X' = 0 \quad (2)$$

図２は提案する軌道制御システムの概観である．工作物座標系で定義した工具軌道は，軌道変換部（$[T_1]$に対応）を介して駆動軸指令に変換され相互補償部（$[T_2]$に対応）に渡される．軌道変換部は，駆動軸の関係を考慮せずに工具の姿勢ベクトルを駆動軸指令に単純に分配する．先に述べたように，多軸工作機械では，この軸指令では目的の工具軌道は得られない．

相互補償部は各駆動軸に対応するサブシステムからなる．サブシステムは，機械の構造的な関係と工具軌道に対する影響によって相互作用する一種の群機械形計算システムである．相互補償部では，駆動軸の現在の状態とお互いの関係から$\Delta X - \Delta X' = 0$となるように駆動軸指令値を調整する．

調整された軸指令は，駆動軸変換部によって取り出され駆動軸制御部に渡される．工作機械はこの指令にしたがって動作する．各駆動軸の実際の動きは相互補償部にフィードバックされ，相互補償部の駆動軸の状態に関する情報が更新される．また，このフィードバック情報は工具軌道変換部（$[T_3]$に

対応）で工具軌道に変換され軌道偏差がチェックされる．軌道偏差がゼロになるまで上記の処理を繰り返す．

４．群機械モデリングの特徴と利点

提案する軌道制御システムは，軌道制御システムの一般化や機械性能の有効活用，ダイナミックスの取扱において，従来型システムにない効果が期待できる．

（１）軌道制御システムの一般化

状況を限定した自由度の範囲で考えれば，滑らかに位置と姿勢が変化する任意の工具軌道に対する機械の連続した姿勢の変化列が存在するはずである．これは，機械の各駆動軸に対する軸指令と$\Delta M' = [T_2][T_1]\Delta X$なる線形変換における係数$[T_2][T_1]$が工具軌道上の指令列に対して各々存在することを意味している．ここでシリアルな構造の機械の場合は$[T_3]$を定式化できるので$[T_3]$を既知とする．

$[T_1]$が既知で$[T_2]$が未知であると仮定する．$\Delta X - \Delta X' = 0$を最適解とした目的関数を定義し何らかの探索手法を用いて探索すれば最適解を与える$[T_2]$が得られるはずである．相互補償部はこのような最適化計算の考え方に基づく処理である．つぎに$[T_2]$が完全に未知ではなく一部の駆動軸間の関係は既知であるとする．これは探索によって求める未知数が減ったことを意味する．相互補償部の構成は同じである．駆動軸の相互の関係を厳密に定式化するのが難しい複雑な構造の機械の軌道制御は以下の条件を満たす$[T_2]$を見出す一種の探索問題として一般化できる．

$$(E - [T_3][T_2][T_1])\Delta X = 0 \qquad (3)$$

$[T_2]$も既知である場合について考える．例えば典型的な３軸の工作機械では$[T_2]$は恒等変換である．また前述の４軸機械ではＢ軸のＸ，Ｚ軸に与える影響を解析的に求めれば$[T_2]$を定義することができる．このような場合でも，$\Delta X - \Delta X' = 0$を満たす$\Delta M'$が１回の探索で得られると見れば，式（３）を評価し$[T_2]$を見つけるという考え方の一般性は失われない．

このように，単純な構造の機械から複雑な構造の機械までの軌道制御を提案するシステムの枠組みの中で統一的に取り扱うことができるようになる．

（２）機械性能の有効活用

機械の自由度が上がれば，同じ工具軌道を発生させる場合でも駆動軸の異なる動きの組み合わせによる運用がある．このような選択肢の中には，駆動軸の能力を効率よく利用できるものがあると考えられる．また，駆動軸に能力の差がある場合には，能力差に応じた駆動軸の組み合わせと動きによって工具軌道を発生させることも考えられる．このような駆動軸の運用を行うには駆動軸の間の相互の関係に基づく協調が必要である．

ユニット機械が協調して目標を達成するというのは群機械の考え方のひとつと思われる．工作機械などにおいても自由度が高ければ，その自由度の中から目標軌道を得るために動かすべき駆動軸を選択するプロセスを協調と見るのは不自然ではない．むしろ各駆動軸がシステムとして協調的に動くとした方が上記のような要求を軌道制御システムの中に埋め込むことが可能となる．

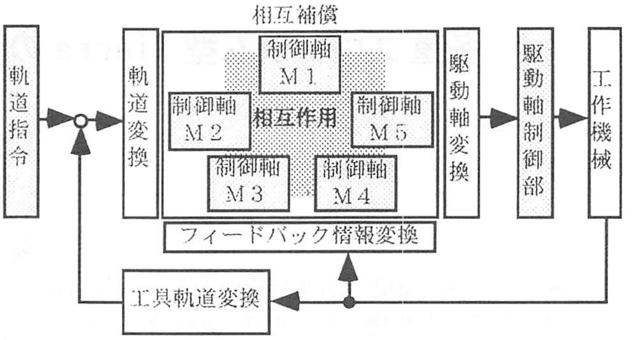

図２　軌道制御システムの構成

このように，相互補償部のサブシステムに駆動軸の能力に関する相互作用を定式化できれば駆動軸を効果的に運用できる可能性が期待できる．

（３）ダイナミックスの取扱

機械系のダイナミクスは軌道誤差の原因になる．このようなダイナミックスによる軌道誤差の要因を制御できない駆動軸と考えれば自然な形でシステム内に表すことができる．このとき外乱駆動軸は工具軌道変換部の中に表せばよい．外乱駆動軸の動きが駆動軸の動きに重ね合わされた結果が実際の軌道になる．相互補償部は目標軌道に対する各駆動軸への分配指令を決めるのであるから，制御できる駆動軸によって外乱駆動軸の動きを補償する軸指令を発生することになる．さらに，相互補償部のサブシステムとして外乱駆動軸をモデル化できれば，ダイナミックスによる軌道誤差をより小さくできる軸指令の生成も期待できる．

ダイナミックスに起因する外乱要因に対して軌道誤差を補償するように駆動軸が動くのは一種の適応と考えることができる．群機械という用語に関する明確な定義はなされていないが，協調し適応する機械システムであると考えてよいであろう．このように考えるならば，外乱要因に適応するシステムとして群機械的モデルを考える利点は少なくないと思われる．ユニット機械がシステムとして振舞うという考え方が工作機械などの軌道制御においても有効であるといえる．

５．おわりに

群機械という考えに基づく多自由度機械の軌道制御システムを提案した．提案した軌道制御システムのシステム構成と軌道制御に関して期待される効果を述べた．本稿では軌道制御システムを群機械的にモデル化することによるメリットを定性的に述べたにすぎない．論点に関する定量的な検証の多くは今後の課題である．

参考文献

１）例えば，吉田，形状記憶合金を用いた小形分散ユニット機械，１９９９年精密工学会春季講演会，ｐ５２３　など．
２）原積，多軸工作機械の軌道制御，２０００年精密工学会春季講演会，ｐ１３３．