

工作機械をめぐる最近の話題

Trends in Recent Machine Tool Technologies



森脇 俊道

Dr. Toshimichi MORIWAKI

神戸大学工学部教授
Professor Department of
Mechanical Engineering
KOBE University

最近における工作機械の技術動向について、高速高能率工作機械、複合加工機、超精密工作機械、制御の高度化・知能化の観点から筆者の考えをまとめた。工作機械は産業の基盤であり、わが国にとって戦略的に重要な製品であるといえる。本稿では今後開発を進めていくべきハードウェア及びソフトウェアの技術課題について、世界の動向も踏まえて筆者の考えを紹介している。

Recent trends in the machine tool technologies are surveyed from the view points of high speed and high performance machine tools, combined multi-functional machine tools, ultraprecision machine tools and advanced and intelligent control technologies. The machine tools are bases of manufacturing industries and they are strategically important products for Japan. The views of the author towards the technical developments in both hardware and software are introduced together with the world wide trends in the relevant fields.

1. はじめに

現在工作機械業界は空前の活況を呈し、生産が需要に追いつかない状況にあるといわれている。特にわが国の工作機械業界は、1982年以来世界第一のマーケットシェアを有し、ここ一両年はいわゆるダントツの強さを見せている。今後ともこの強みを維持していくためには、単に生産設備を補強してだけでなく、次のニーズに対応し、後から追いかけてくる他国の工作機械に負けない高付加価値を維持していく、着実な研究開発が必要であろうと考える。

本稿では、筆者が所属するCIRP（国際生産工学アカデミー）などを中心に、話題となっている事柄や、将来に向けた研究開発の動向をまとめてみたい。

2. 高速高能率工作機械

工作機械主軸の最高回転数や送り速度がますます高まり、いわゆる高速高能率化していることは良く知られているとおりである¹⁾。このような高速化の背景や、基礎となる基盤技術、利点の主なものを簡単にまとめ

ると、表1のようになろう。ここでは個々の技術について詳細な点は別の専門的な論文に任せるとして、利点の内の一点だけ、びびり振動の回避について紹介しておく。

1960年代から70年代にかけて、工作機械のびびり振動に関して世界的な規模で研究が行なわれた。その結果として、いわゆる再生型びびり振動や強制びびり振動の発生原理が明らかにされ、対策の基本的な考

表1 高速高能率工作機械の背景、基盤技術と利点
Background, supporting technologies and advantages of high-speed, high-efficient machine tools

高速・高能率工作機械

(背景、基盤技術)

- 高能率加工、コスト低減の必要性
- 高速主軸、高速送り（リニアモータなど）の開発
- 高速切削加工対応工具の開発、切削技術の高度化など

(利点)

- 加工時間の短縮（能率向上）
- 加工精度・仕上げ面性状の改善
- びびり振動の回避

え方が示されたが、それ以来系統的な研究はあまり行われなくなってしまった。

最近になって難削材の加工や、航空機用のアルミニウムの高速・高能率切削などにおいて、びびり振動が新たな問題として取り上げられるようになった。一般にはびびり振動が発生すると切込みや切削速度を落として回避（低速安定性）するが、主軸速度を上げることによってびびり振動を回避することは可能である。このことは1960年代の研究でも既に知られていたが、当時はそのような高速主軸が存在しなかったため、単に理論的な可能性としてのみ捕らえられていた。エンドミル加工などのフライス加工におけるびびり振動を理論的に取り扱うことは数学的にも困難であったが、Y. Altintas教授らの研究成果としての図1に示すような安定線図が描かれている。これは横軸の主軸回転数に対して、葉状のローブ以下の切込みではびびり振動が発生しないことを示している。この詳細²⁾については省略するが、図中の右に示しているように、主軸一回転前、あるいは一刃前の切削によって生成された仕上げ面の凹凸と、現在の切れ刃が生成している仕上げ面の凹凸によって作られる切りくず厚さの変動が切削力変動を生じ、このことが振動を持続するもととなる、というのがびびり振動発生原理である。ここで振動周波数に匹敵する高速で主軸を回転させると、前回と今回の振動の位相差をうまく制御することが出

来て、切りくず厚さの変動をなくすることが可能となり、この条件では切込みを大きくしてもびびり振動は発生しない。

この原理を応用して、アルミニウムなどの航空機部品の高速高能率切削が実現されている。関連して、主軸及びチャックや工具を含む主軸系の動特性に対する関心が高まり、軸受や設計諸元と主軸、主軸系の動特性の関係が理論的、実験的にも明らかにされつつあり、主軸設計にフィードバックされるようになってきている。最近では解析や設計のための各種ソフトウェアの利用も広く行われるようになってきており、主軸設計に関する理論的な検討は今後益々重要になると考えられる。

3. 複合加工機

現在高速高能率切削工作機械と並んで話題になっているのは、5軸マシニングセンターや複合旋盤（ターニングセンター）などの複合加工機であろう。複合加工機開発の背景や利点を簡単にまとめて表2に示す。複合加工機は大まかに、旋盤を基礎に発展してきたターニングセンター（TC）とフライス盤から発展してきたマシニングセンター（MC）に大別することができる。

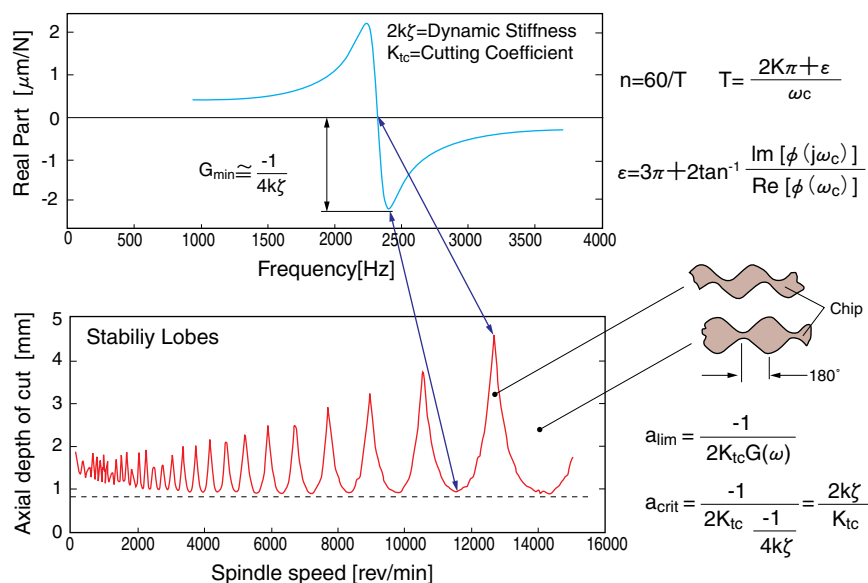


図1 再生型びびり振動の安定線図 (Y. Altintas)
Stability chart of regenerative chatter vibration

表2 複合加工機の背景、基盤技術と利点
Background, supporting technologies and advantages of combined multi-functional machine tools

同時5軸制御マシニングセンター (例：直交3軸+回転2軸)
複合加工旋盤 (例：旋盤+第2主軸, B軸, Y軸など)

(背景, 基盤技術)

- より高度(複雑)な部品の高精度, 高能率加工の必要性
- 支援ソフト(CAM)の高度化
- 高精度, 高能率機械要素(例：DDモータ駆動テーブルなど)の開発

(利点)

- 加工精度の向上, 加工時間の短縮(ワンチャック加工)
- 複雑形状の加工

旋盤系の複合加工機による加工事例を調査した結果の一部を図2に示す。内外径や端面の加工に加えて、斜面の加工やホブ切りなども一部では行われている。最近では、タレット部に相当する部分に取り付けられる主軸もエンドミルなどの補助的な切削に利用されるのではなく、本格的なフライス加工ができるものも現

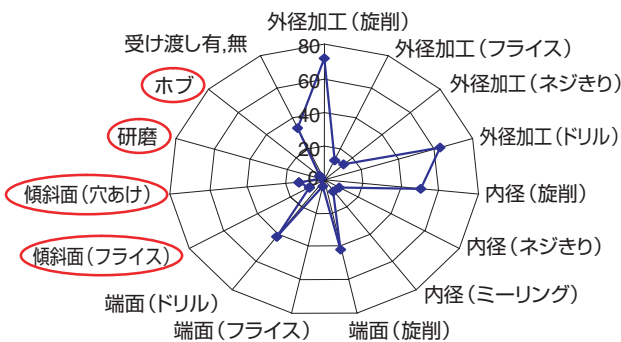


図2 旋盤系複合加工機による加工事例の調査結果
Survey of machining examples by combined multi-axis machine tools based on turning machines

れており、旋盤系の工作機械からフライス型の工作機械に近いものも開発されている。このような複合加工機の例を図3(森精機製作所製NT5400DCG)に示す。

他方、マシニングセンターについてみれば、多くの異なった種類の5軸マシニングセンターが開発されている。中でも直交3軸のたて、横マシニングセンターに加えて、工作物テーブルに回転と揺動の2軸を付加した同時5軸制御マシニングセンターが広く利用されている。さらに最近では、工作物テーブルの駆動をDDモーターによって行い、高速高馬力の回転テーブルで高速割り出しの他にたて型旋盤の機能を持たせているものも現れている。このように、当初旋盤とフライス盤から始まった複合加工機は、今後両方の機能を分離することができない新たな複合加工機に進展していくことも考えられる。

複合加工機の利点は、単に5軸制御を必要とする複雑な形状の加工のみならず、一度工作物を取り付けることによって全ての加工が行われるため、工作物の取り付け取り外しに伴う精度劣化を防ぐことができる上、機能集約型の部品が増える中であって、高精度、高能率の加工を実現することなどがあげられる。複合加工機はこれからの差別化した工作機械として、ますますその需要が増えると考えられるが、高度な機能を実現するハードウェアの開発とともに、制御の高度化、利用技術の面からの高度な支援ソフト(CAM)の開発が重要な課題となろう。

ちなみにCIRP(国際生産工学アカデミー)のSTC-M(Scientific Technical Committee Machine「機械」科学技術委員会)では、2年後をめどに複合工作機械の技術の現状と今後の動向をキーノート論文として取りまとめることにしている。

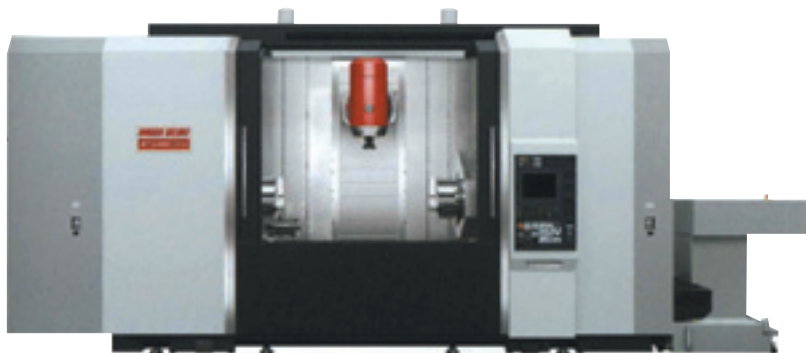


図3 複合加工機の例(森精機製作所NT5400DCG)
An example of combined multi-axis machine tool (Mori Seiki Co. NT5400DCG)

4. 超精密工作機械

高速高能率と並んで工作機械に要求されるのは高精度である。最近では高精度工作機械からさらに進んだ超精密工作機械が種々開発されてきている。これまで超精密工作機械が必要とされる分野は限られており、超精密工作機械のマーケットは比較的小さかったが、最近では主として光学部品の金型を中心とした超精密加工、各種マイクロ部品の加工など超精密・マイクロ加工の要求が増え、それに伴って各種超精密工作機械の開発が進められてきている。

超精密工作機械が必要とされる背景、超精密工作機械を実現するための基盤技術、また超精密加工の利点をまとめると表3のようになる。特に空気静圧軸受や案内など超精密機械の要素技術の進歩は著しく、こうしたハードウェア技術の進歩がわが国の工作機械の高付加価値化に貢献しているといえる。

表3 超精密工作機械の背景、基盤技術と利点
Background, supporting technologies and advantages of ultraprecision machine tools

| 超精密工作機械（超精密切削，研削加工機） |
|--|
| <p>（背景，基盤技術）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 超精密・マイクロ部品の要求増大（光学関連部品，金型など） ● 超精密機械要素（主軸，案内，送り駆動系など）の高度化 ● 高精度制御技術 |
| <p>（利点）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 超精密・マイクロ加工による新たなマーケット開発（ニーズに対応） ● 光学関連部品，マイクロ・メカトロ部品など |

表4 超精密マイクロ加工の動向
Trends in ultraprecision micro machining

| |
|---|
| <p>1. 形状精度，仕上げ面粗さ：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● マイクロ→ナノ |
| <p>2. 形状（光学部品の場合）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 球面→非球面→非軸対称→自由曲面 |
| <p>3. 工作物材質</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 軟質金属（アルミニウム，銅など） ● 硬質金属（ニッケル，焼入れ鋼など） ● 脆性材料，異方性材料（ニオブ酸リチウム，蛍石など） ● 硬脆材料（超硬合金，セラミックなど） ● その他材料（プラスチックなど） |

光学部品を中心とした超精密マイクロ加工の最近の動向は表4に示すように、形状精度や仕上げ面粗さに対する要求が一段と厳しくなる中で、加工すべき形状も複雑になってきている。また光学レンズも従来のプラスチックの射出成形から、ガラスのホットプレス加工への移行に伴い、金型材料も超硬合金やセラミックスなど極めて加工しにくい材料が増えている。これらの金型は研削加工、ポリシングなど多くの工程を経て加工する必要がある。現在巷に数多く出回っているカメラ付き携帯電話のレンズ、デジタルカメラのレンズはこうした金型加工技術とガラスのプレス成形技術の成果である。

さらにレンズについてみれば、光学特性を向上するためフレネルレンズと非球面レンズの組み合わせなど、より高度の加工が要求されつつある。またレーザープリンターなどレーザー光を利用する光学機器においては、非軸対称や自由曲面といったより高度な光学系が要求されており、超精密加工の高度化への要求は止まるところを知らない。そのため超精密加工、マイクロ加工に必要な超精密工作機械は、最先端の高付加価値部品を加工する工作機械として今後一層その重要性が増すと考えられる。

自由曲面を超精密、高能率で加工する装置の一例として、3軸FTS（ファースト・ツール・サーボ）³⁾の例を図4に示す。これは図に示すように、超精密回転テーブル上に固定した工作物を回転させながら、高速高応答周波数で3軸方向に切り込み制御が可能な工具を、半径方向に移動させながら切削加工する装置である。ここで工具を半径方向に送りながら高速で軸方向

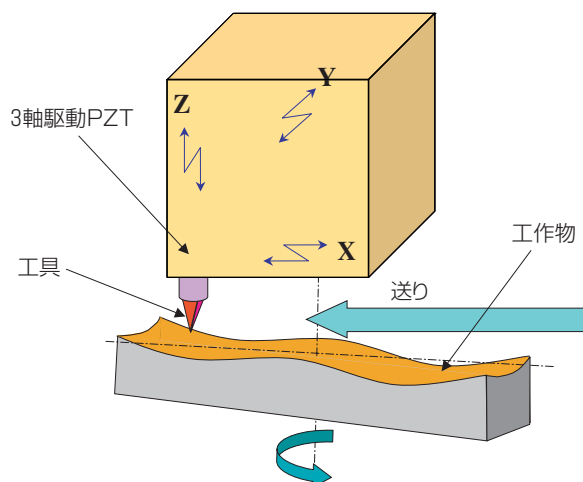


図4 3軸駆動FTSによる超精密加工の概念図
Schematic illustration of ultraprecision cutting by 3-axis FTS

に切り込み制御を行なえば、理論的には任意の形状を工作物表面に仕上げることが出来る。しかしながら実際には工具の応答周波数、応答速度をいかに上げてても切削方向に直角な段差を作ることはできない。そこで工具を3軸方向に同時制御することにより、加工しえる形状の自由度を増やし、また制御すべき工具の運動軌跡をより簡単にする事が可能となる。こうしたFTSを用いることにより、自由曲面の切削加工時間を大幅に短縮することが可能となる。

5. 制御の高度化・知能化

工作機械ハードウェアの進歩と並んで、忘れてならないものはソフトウェアの進歩であろう。関連した背景、利点などをまとめて表5に示す。最近では単にNC機能の高度化だけではなく、工作機械の特性や加工プロセスを理解した上でのより高度な制御(知能化)も進められている。例えば、工作機械の加工精度を阻害する最も重要な熱変形について見れば、工作機械の情報や、温度情報をもとにリアルタイムで熱変形を推定し⁴⁾、それに基づいて機械の運動を制御し、いかなる条件下でも高い加工精度を補償するような高度な制御も実用されている。

工作機械に与える運動制御情報を基に、工作機械の運動をリアルタイムでシミュレートすることも可能である。この考え方を利用して、オークマでは実際の工作機械の動きに少し先行したシミュレーションを行い、例えば工具とチャックが干渉して衝突するような事態を直前に知って機械を止める、アンチクラッシュシステムを開発している。図5にその概念図を示す。

こうした考え方のさらに進んだ研究として、先に述べたCIRPのSTC-Mでは現在バーチャル・マシンツールの名のもとに、加工プロセス、工作機械の動特性や

表5 制御の高度化・知能化の背景、基盤技術と利点
Background, supporting technologies and advantages of advanced and intelligent control technologies

| 制御の高度化・知能化 |
|---|
| (背景、基盤技術) |
| <ul style="list-style-type: none"> ●より高機能、低コストの制御装置への要求 ●高速・高精度の補間システム ●リアルタイム熱変形補正 ●シミュレーションを併用したアンチクラッシュ・システム ●コンピュータ、IT技術の高度化 |
| (利点) |
| <ul style="list-style-type: none"> ●工作機械の高付加価値化 ●ノウハウの技術化 |

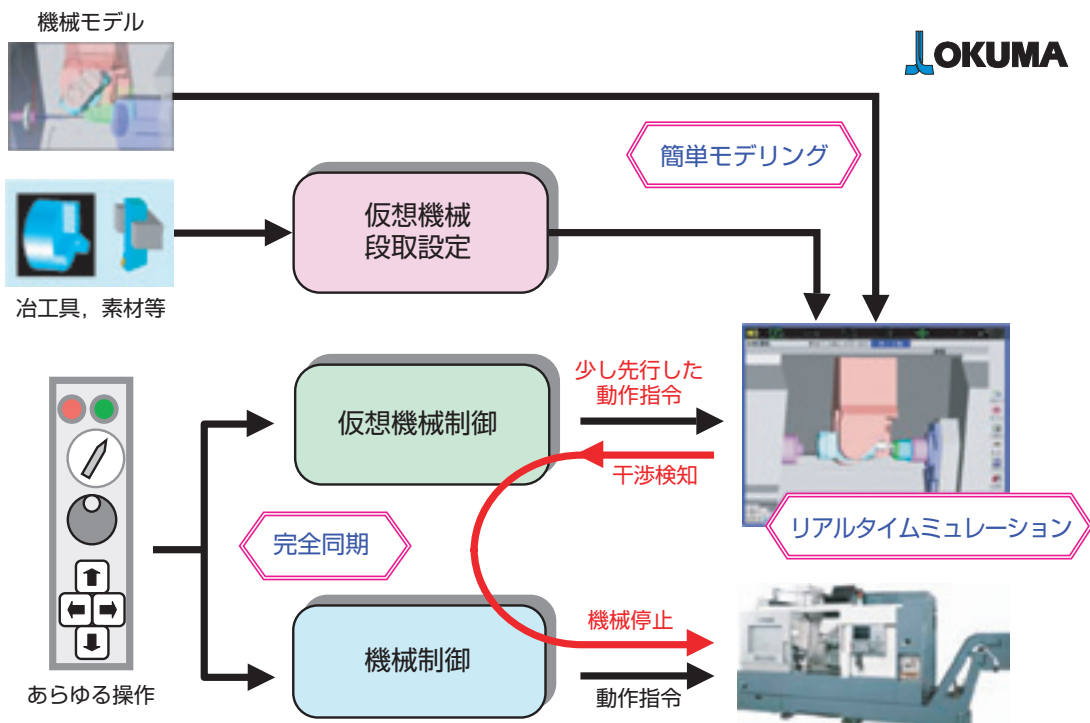


図5 アンチクラッシュシステムの概念図 (オークマ)
Conceptual diagram of anti-crash system (Okuma Co.)

制御特性など、全てを含む完全なシミュレーションを行うことを試みている。例えば工作機械に運動命令を出すと機械各部がどのように応答し、工具と工作物がどのように干渉して切削が行われ、その結果発生する切削力が機械と工具にどのように影響を与えるか、というようにコンピュータ上で機械とプロセスの完全なシミュレーションを行おうとするものである。一例として図6にバーチャルなCNCシステムのアーキテクチャ⁴⁾を示す。

バーチャル・マシンツールが現実のものとなるためには、今後まだまだ加工プロセス、工作機械のダイナミクス、運動特性など多くの事柄についての研究を進める必要があるが、着実に研究が進展しつつあることを指摘しておきたい。

6. まとめ

工作機械技術の動向に関して、筆者の身近な経験からいくつかの代表的な項目について紹介した。工作機械はわが国を代表する基幹の機械産業であり、今後とも高速・高能率、超精密に関する研究は、一段と先鋭化しながら継続されると考えられる。中でも重要な機械要素である主軸受に求められる超高速・超高精度という永遠のテーマに対して、NTNの技術、製品が世界をリードしていくよう、関係各位の引続きのご努力に期待したい。

参考文献

- 1) 垣野義昭：NC工作機械主軸系の最新動向，NTN，Technical Review, No. 72(2004) p2.
- 2) Y. Altintas, M. Weck: Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding, Annals of the CIRP, 53/2 (2004) p619.
- 3) Wada et. al.: Development of Three-axis Fast Tool Servo for Ultraprecision Machining, Proc. 6th Int. Conf. of euspen (2006) p115.
- 4) 千田治光ほか：量産を目的とした工作機械の主軸熱変位推定（第2報），日本機械学会論文集C編，71-709 (2005) p2813.
- 5) K. Erkorkmaz et. al. : Virtual Computer Numerical Control system, Annals of the CIRP, 55/1 (2006) p399.

〈著者紹介〉

森脇 俊道 (もりわき としみち)
神戸大学工学部 教授 (工学博士)

1966年 京都大学工学部精密工学科卒業
1968年 京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了
1974年 神戸大学工学部 助教授
1975年 カナダ・マクマスタ大学 助教授
1985年 神戸大学工学部 教授 (2000年-2004年 工学部長)

専門分野：生産システム、工作機械、人間工学
受賞・表彰歴：

CIRP (国際生産加工研究会) F.W.Taylorメダル 1977
工作機械技術振興賞 (工作機械技術振興財団) 1991, 1994,
1995, 1998, 2001

井植文化賞 (科学技術部門) (井植記念会) 1998

精密工学会賞 2002,2003

兵庫県科学賞 (兵庫県) 2004 等 他多数

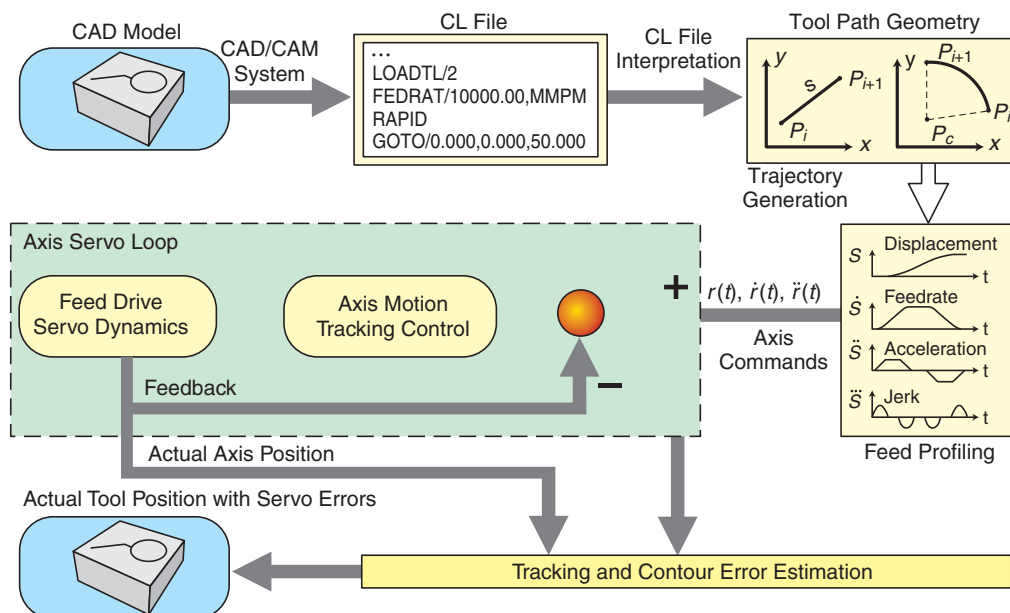


図6 バーチャルなCNCシステムのアーキテクチャ⁴⁾
System architecture of virtual CNC