

データ共有により加工精度と生産性を向上する  
統合 CNC システムの開発

2020 年度

須 藤 雅 子

学位論文 博士（工学）

データ共有により加工精度と生産性を向上する  
統合 CNC システムの開発

2020 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

須 藤 雅 子

# 目次

第1章 緒論 .....	1
1-1 緒言 .....	1
1-2 数値制御装置の役割と市場の要求 .....	3
1-3 NC工作機械の稼動における問題点 .....	6
1-3-1 NCプログラムの情報量問題 .....	6
1-3-2 情報の相互運用性の低さの問題 .....	8
1-3-3 経験・知見の継承問題 .....	9
1-4 本研究の目的 .....	11
1-5 本論文の構成 .....	12
1-6 結言 .....	13
第2章 NC工作機械の高度利用のための従来の試み .....	14
2-1 緒言 .....	14
2-2 NC工作機械の始まり .....	14
2-3 CNCの発展 .....	17
2-4 CNC指令の変遷 .....	22
2-5 CNC機能の発展 .....	28
2-6 CNC今後の課題 .....	32
2-7 結言 .....	32
第3章 統合CNCシステム .....	34
3-1 緒言 .....	34
3-2 統合CNCシステムのプラットフォーム .....	35
3-3 構造化データモデル .....	38
3-4 共有データベース運用方法 .....	40
3-4-1 専用の加工指令 .....	40
3-4-1-1 特徴点情報データモデル .....	40
3-4-1-2 加工指令データモデル .....	42
3-4-2 加工改良の共有 .....	43
3-4-2-1 加工技術情報データモデル .....	44
3-4-2-2 加工実績による加工指令の改良 .....	45
3-4-2-3 評価の指標 .....	47
3-5 結言 .....	49
第4章 統合CNCシステムによる加工精度向上 .....	50
4-1 緒言 .....	50

4-2 CAD の設計情報の継承による精度向上.....	50
4-3 特徴点情報の抽出と活用.....	51
4-3-1 加工ストラテジー.....	53
4-3-2 軌跡精度.....	56
4-3-2-1 工具軌跡演算.....	56
4-3-2-2 実加工工具軌跡.....	59
4-3-3 加工時間.....	61
4-4 形状情報の活用.....	62
4-4-1 加工ストラテジー.....	65
4-4-2 軌跡精度.....	69
4-4-3 加工時間.....	73
第5章 統合 CNC システムによる生産性向上.....	75
5-1 緒言.....	75
5-2 加工セルによる加工実行情報の収集.....	75
5-3 加工実行情報に基づく加工技術情報の生成.....	77
5-4 加工技術情報活用の検証.....	79
5-4-1 加工対象 1.....	79
5-4-2 加工対象 2.....	82
5-5 結言.....	83
第6章 結論.....	85
謝辞.....	88
参考文献.....	89
関連論文.....	94

# 第1章 緒論

## 1-1 緒言

数値制御（NC：Numerical control）は、「工作物に対する工具経路，加工に必要な作業の工程などを，それに対応する数値情報で指令する制御」であり，コンピュータ化された数値制御（CNC：Computerized numerical control）は，「コンピュータを組み込んで，機械機能の一部，または全部を実行する数値制御」と定義されている<sup>[1]</sup>．数値制御装置（以下 CNC と称する）は，製造業において生産設備に欠かせない工作機械や搬送装置，産業用ロボットの制御に広く使用されている．一般的なコンピュータと違い，CNC は機械制御という特定の機能を実現する目的に特化されている．その特定の機能を極限まで高める目的で生み出す技術は，機械性能の向上だけでなく，その技術が製造業に波及することで製造技術の技術発展を推進する役割を担っている．

CNC の機能は，外部から入力されたプログラムを解析して，機械を構成する各軸の移動量に分配し，機械を動作させることである．その機械動作により一定の計画のもとに作業が行われ，加工や組立てという所望の目的を果たす．制御する機械の作用点には，重力や摩擦力という様々な応力がかかり，さらに機械運動による発熱や環境変化に起因する機械変形などが加わるため，プログラムから機械動作を作り出すだけでは，設計どおりの結果を得ることはむずかしい．機械特性を考慮するとともに，作業中の機械状態を監視して，移動量に誤差分の補正をかけるという状況に応じたリアルタイムの制御が必要とされるため，制御アルゴリズムは複雑性を極める．

制御の特定の機能として，生産機械の性能特性の中で重要視されるのは高速高精度機能である．プログラム指令どおりに正確に軌跡を描き，指令速度で移動するには前述のように極めて複雑な制御が要求される．加えて高精度には，マイクロメートル単位や，ナノメートル単位の正確な位置決め精度と繰り返し精度で実行できることが必要である．このような制御が機械実装できれば，金属加工であれば複雑な形状に対する高精度加工で付加価値の高い製品製造を，産業用ロボットであれば高い繰り返し精度で正確な組立てや搬送作業による高い生産性を実現できる．反面，高精度で複雑形状を加工できる数値制御装置は大量破壊兵器製造に使用される高精度な部品製造の能力をもつという背景から，戦略物資として輸出貿易管理令<sup>[2]</sup>で輸出には厳しい管理を受ける．高精度な制御技術を利用するには，高い機能を開発・供給すると同時に，世界秩序を守る社会的責任を果たすことも要求される．

製造現場において，高精度な制御は高速で実現することに意味がある．高速化は制御のみならず，機械の剛性や，構成する部品の材料特性，機械動作に伴う発熱の影響など，考慮すべき複雑な問題を克服して実現できる．図 1-1 に金属加工において，複雑形状で高速加工が要求される代表的な工作物であるインペラを示す．金属加工の高速加工とは，切削工具を高

速回転させ、それに応じた高い送り速度で切削を行う加工の高能率化を意味する。一方で、工作物を加工する際に発生する切り屑の排出量の増加や、工具磨耗の進行が早くなるといった複合的な問題を抱える。これらの問題に対しては、切削速度増加と共に切削性が高まる現象が解明されており、高速加工は工具や加工現象の研究とともに探求されている。産業用ロボットにおいては、垂直多関節型では機械剛性が低く絶対位置精度が低いため、高速化するとオーバーシュートや振動の問題が発生する。高速性が必要とされる作業には、制御に加え、スカラロボット（水平関節型ロボット）の直交方向の高速性や、パラレルロボットの合成速度の高速性など特化した機構で実現している<sup>[3]</sup>。

CNC は汎用のコンピュータ技術の機能を融合しつつ発展している。AI（Artificial intelligence）を活用した知能化や、製造現場のデジタル化の進化に伴い、複合的な領域を制御することが可能になっている。IoT（Internet of things）で収集したデータを活用してデジタルツインを実用化する場合に、CNC はより多くのデータを活用するプラットフォームとしての仕組みが必要とされることから、周辺装置や IT（Information technology）と連携する情報端末としての役割が強化されつつある。

CNC は従来の演算の高速化という手法に加え、デジタル製造の情報端末としてのアプローチによっても、高速高精度を極め、高品質な安定生産を実現できる。本章では金属加工を目的とした工作機械における高速高精度な加工への市場要求と、CNC の従来の制御方法による問題点について述べた後、本研究の目的について述べる。



Fig. 1-1 Impeller (<https://www.nc-net.or.jp/>)<sup>[4]</sup>

## 1-2 数値制御装置の役割と市場の要求

CNC を搭載した NC 工作機械は、「工具と工作物との相対運動を、位置、速度などの数値情報によって制御し、加工に関わる一連の動作をプログラムした指令によって実行する工作機械」である<sup>[5]</sup>。工作機械は、主として金属の工作物を、切削、研削という工法によって不要な部分を取り除き、設計形状を作り上げる機械である。CNC は、プログラム指令により機械動作を自動化できることに加え、加工中の状況を CNC の表示器に表示することでリアルタイムに監視でき、また、記憶媒体に数値として記録することで、工程終了後に加工実行時の情報を確認することができる。加工情報を監視・記録できることで、不具合が発生した場合に情報を分析して問題解決ができるという利点がある。反面、自動運転中に不具合を検出できなければ、不良品を大量に生産してしまう可能性もある。加工準備としての正確な段取りと、試作品の検査・確認という自動運転前の人手による事前準備は大変重要な工程といえる。

NC 工作機械は、大量生産、または多品種少量生産にかかわらず、高精度で高い生産性を実現する設備としての役割と、母性原理 (Copying principle) にもとづく精密機械加工におけるマザーマシンとしての役割が知られている。母性原理とは、生産される機械や部品の精度は、それを作り出す工作機械の精度によって決まることであり、精度が高い工作機械や産業機械を製造するためには、それ以上の精度をもった工作機械が必要になることを意味する。工作機械産業の技術発展は、製造業の技術水準の基盤強化の礎となっている。これに加え、技術的収斂 (Technological convergence) という役割も指摘されている。技術的収斂とは、特定の目的で開発された専用技術が、他の産業が抱える技術問題に応用することで技術移転が成立することをいう。19 世紀の米国では、繊維機械の工機部門が独立することで、金属加工技術が兵器や自動車という他の産業の製造技術に移転されていった。工作機械のために開発された新しい技術や機能は、生産設備に投入されることで、工作機械を経由して工作機械以外の産業に波及している。工作機械の技術的収斂とは、多くの産業の技術水準は工作機械を経由して、ある一定範囲に収斂するというメカニズムのことである。原田は、CNC の技術的収斂について、工作機械メーカーやユーザの発案や独自の要請を CNC に移転し、CNC の汎用機能として組み込むことで、CNC 自体の性能と制御対象の技術水準に波及し、CNC の技術的収斂が達成されたことを指摘した<sup>[6]</sup>。

NC 工作機械は、機械運動の基準となるコラムやベッドという主要構造要素、それらを結合する結合部、運動要素を駆動する駆動機構という 3 つの要素から成り立っている。図 1-2 に、マシニングセンタにおける例を示す。主要構造要素は、コラムやベッドのように機械の構造体となる要素と、テーブルや主軸のように運動要素がある。結合部は、主要構造要素同士を運動エネルギーや自重の影響に耐性をもつように固定している。駆動機構は、テーブルや主軸頭のように直進運動する機構と、主軸のように回転運動する機構で構成される<sup>[7]</sup>。それぞれの要素が高い技術で結合されることにより、高い位置決め精度と繰り返し精度によ

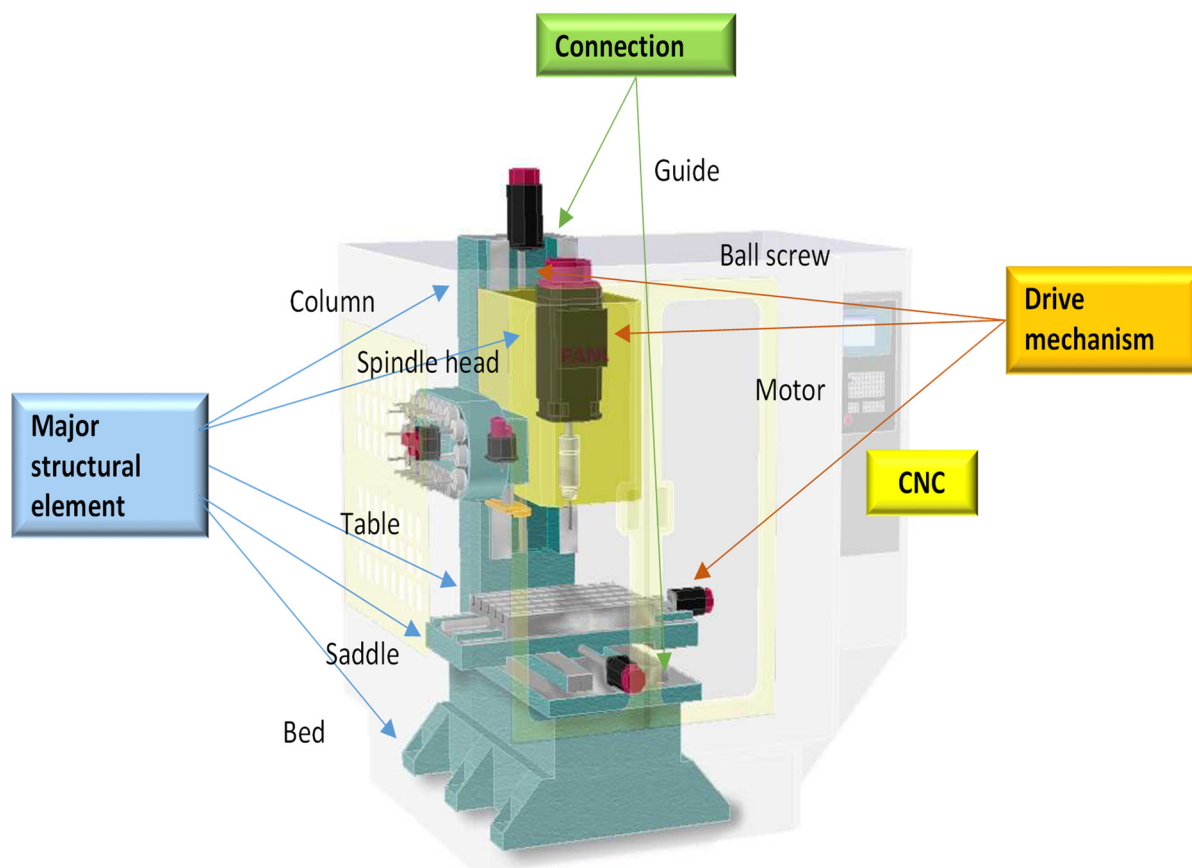


Fig. 1-2 Basic components of machine tools

る高速高精度の加工を実現している。

自動化のために、自動工具交換機や切り屑処理装置などの周辺装置、さらに加工物の供給用に産業用ロボットが装着されるシステム化が進んでいる。近年は CNC が周辺装置も含めたシステムとして NC 工作機械を制御するようになってきている。

CNC は、記憶媒体上で符号化されたコマンド群で作られたプログラムを解釈するコンピュータと、機械の駆動部を動作させるサーボ機構を組み合わせたシステムである。数値形式のプログラムを解析して、位置決め、輪郭移動、および機械指令を実行形式に変換する。この実行形式で駆動機構を制御することにより、工具が移動して金属を切削し、加工物にプログラム指令を転写することで製品が生まれる。あらかじめプログラムを作っておけば人手を介さず工作機械を自動化でき、安定した品質の製品を生産できる。図 1-3 に CNC の基本構造を示す。

NC 工作機械が配備される生産設備には、大きく分けて 2 種類の加工要求がある。第 1 は大量生産を目的に、高い位置決め精度と繰返し精度による正確な精度の形状を高速で加工することである。第 2 は金型加工のように、複雑形状を多軸の複雑な機構の工作機械で高



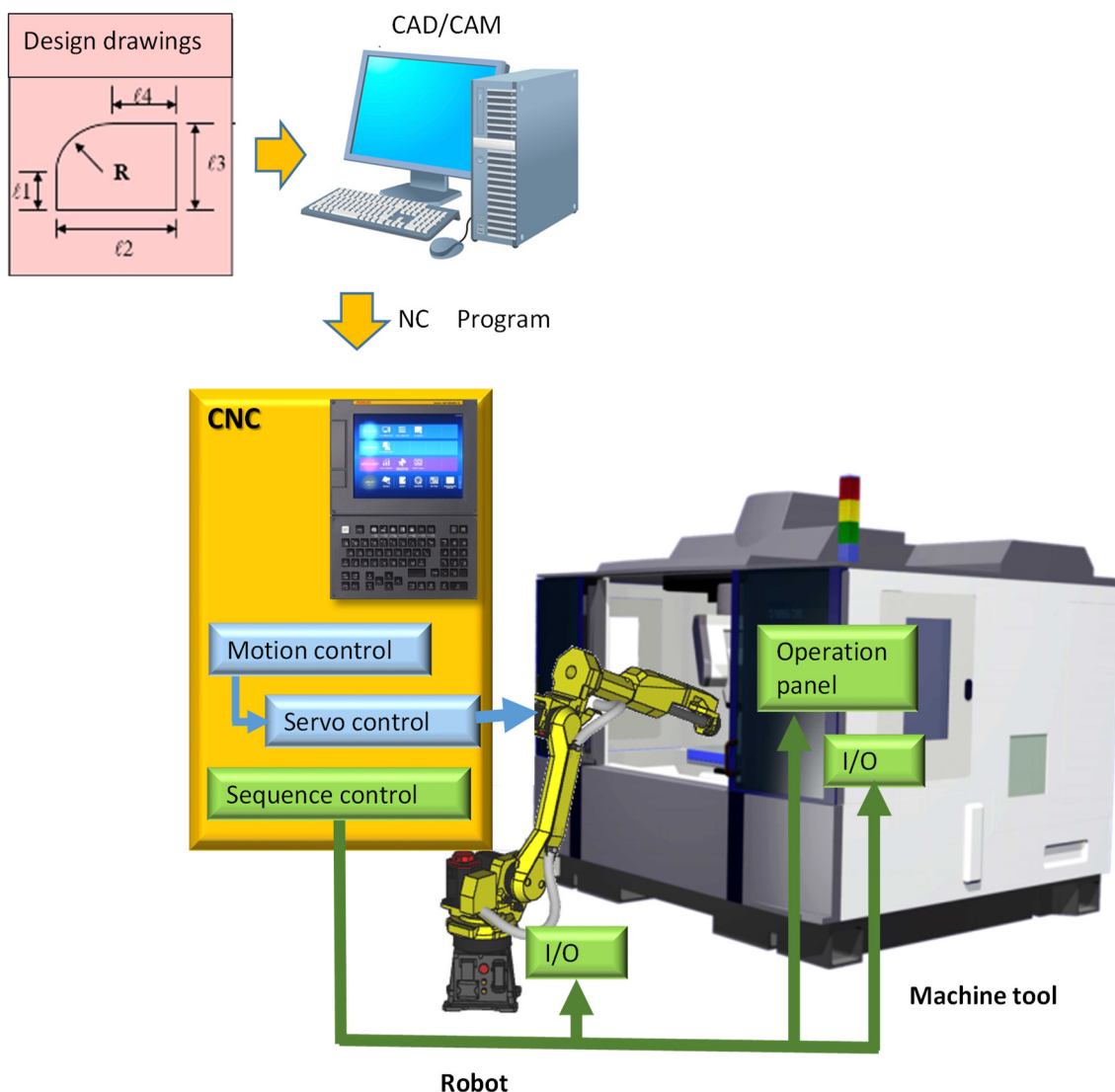


Fig. 1-3 Basic components of computerized numerical control

精度を保ったまま長時間加工できることである。いずれの場合も、不具合の発生や、予期せぬ停止があると、連続生産では大量の不良品を産出してしまう。また、金型や大型部品の加工では高価な素材を無駄にになってしまうことになる。CNCには高性能な機能に加え、生産設備を不具合で停止させない高い信頼性が要求される。

CNCは、プログラムを解析して移動指令を生成すると同時に、個々の工作機械の機械特性に合わせて設定した最高速度や、加減速の時定数に従ってリアルタイムで速度制御を行う。複数の移動軸で構成される多軸工作機械の場合でも、複数軸の位置制御と速度制御を同時に高速演算処理することで複雑な動きを正確に実行する。CPUの処理能力の高速化やメモリの大容量化によりCNCの多軸制御が高速に行えるよう処理能力が向上したことに加え、上述のような多様なアルゴリズムをソフトウェアで並行処理することで、複雑な加工を

高精度で行えるようになった。

NC 工作機械はその時代に実現しうる最高の速度と高精度な加工を訴求し続けてきた。現在は、ナノメートル単位で制御するナノ加工機が登場している。1nm で制御するために CNC は、数値計算の誤差を排除するため 1pm 単位の演算を行っている。数値演算処理する線分が極小になるということはプログラム指令も細分化され、演算処理にかかる時間が増大する。生産設備としては、精度追求のみならず同時に高速性も要求されるので、CNC への指令に対しては、微細化だけが求められる技術ではない。微細化による精度の追及は限界点に近づいているといえる。

近年は生産効率の向上を目的に工作機械の複合化が進んでいる。工作機械は加工種類ごとの専用の加工機から、ミリング加工と旋削加工やレーザー加工などの異種の加工種類を 1 台に集約する工程集約型複合機が多種にわたり開発されている。単体機を並べ工程分割をした効率的なタクト生産が主流であった量産加工ラインから、分割した加工工程を集約することで、工程待ち時間の削減、および、段取替えごとに蓄積する設置誤差の削減で、生産を効率化できる。CNC は、加工種類ごとに特化した専門性の高い制御を行っていたが、近年は CNC の処理能力の向上に伴い 1 台の CNC で制御できる対象が増加し、複数の加工種類を同時に制御できる機能複合型の CNC が主流になっている。また、CNC は工作機械の制御に加え、計測装置や洗浄機能などの周辺装置、さらには IoT 導入による外部機械との連携のハブとしての役割も加わっている。NC 工作機械を制御する CNC の機能複合化は、生産性向上に必須な技術である。前述のように、製造現場のデジタル化で、生産設備のみならず生産プロセスの高度化・自動化が進む中、CNC には工作機械とその周辺機器の情報プラットフォームとしての役割がある。

### 1-3 NC 工作機械の稼動における問題点

#### 1-3-1 NC プログラムの情報量問題

数値制御装置 (CNC) に与えられるプログラムは、一般的に NC プログラムと呼ばれる。ISO6983 (Numerical control of machines-Program format and definitions of address words)<sup>[8]</sup>で規定された工作機械用の工具を移動させる G コードや、おもに機械を動作させる M コードで構成される NC プログラム様式が世界的に普及している。工作物は、図 1-4 に示す加工プロセスで加工される。CAD で設計された製品形状は、CAM によって工具経路が導出され、ポストプロセッサによって工具経路に速度指令や主軸情報を考慮した G コードに変換されることで NC プログラムが生成される。CNC はこのプログラムのコードを解析して工作機械を駆動するという加工のプロセスチェーンで成り立っている。このプロセスチェーンでは、各プロセスで生成した多くの情報がプロセス間で失われており、前のプロセスから有意な情報やノウハウを次のプロセスが継承するような仕組みは備わっていない。

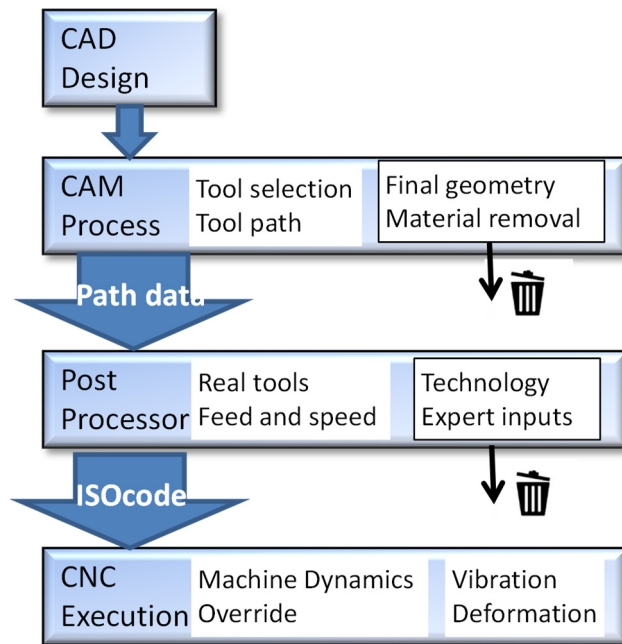


Fig. 1-4 General machining process chain

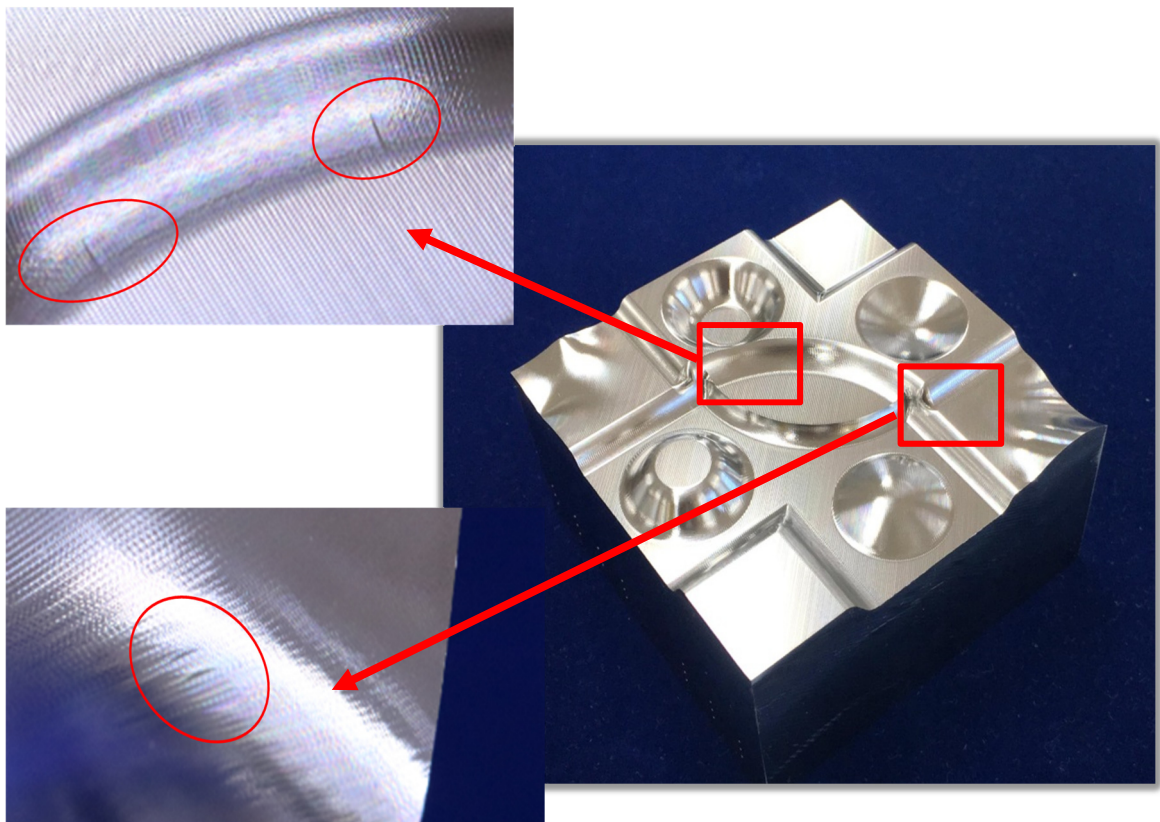


Fig. 1-5 Magnified photo of machined surface

CAD で設計された製品形状は、NC プログラムにおいては、直線、円弧といった幾何情報と、穴あけなどのサイクル指令の G コードの組み合わせで構成される。G コードでは移動先の座標値や、移動の速度が数値で指令される。このように、NC プログラムは連続する数値データとして表現され、数値データはあくまで工具や機械の A 点から B 点への移動のみを読み取ることができる。ISO コードの NC プログラムの情報量は非常に限られており、元の製品形状情報を表現することはむずかしい。現状の CNC は NC プログラムの G コードを解析し、CAD で設計されたであろう設計形状を推論して、かつ工作機械の加減速などの機械特性をも考慮して工具軌跡を再構成している。製品形状が複雑な自由曲面を含む場合は、CNC が生成する工具軌跡は推論による CAD データの近似であるため、精度低下という問題が発生する可能性がある。推論のアルゴリズムの特性や、機械特性を十分に考慮しない速度制御アルゴリズムによっては、経路誤差を発生することになる。図 1-5 は、曲面上の往復の工具経路の軌跡誤差による加工面不良の写真である。赤枠内を拡大すると、往復パス加工による、工具の往路と復路の軌跡誤差によって発生した経路段差が加工面不良の要因であることがわかる。

NC プログラムは工具の移動情報で成り立っていることから、製品の形状情報は失われており、精度低下の一要因となっている。工具経路の精度低下問題の解決方法の一つは、CAD から製品形状情報を継承して CNC が利活用することである。CNC が加工実行のため工具軌跡を再構成する時に、形状に由来する情報を経路や速度の計算に最大限利用することができれば、従来の推論による工具経路に比較して、精度高く形状を再現する工具軌跡を作成可能になる。

### 1-3-2 情報の相互運用性の低さの問題

図 1-4 に示すように現在の加工のプロセスチェーンは、一方向の不可逆的な情報フローのため、情報の相互運用性は極めて低い。機械加工に関わるすべてのソフトウェアツールとコンポーネント（おもに CAD, CAM, CNC）はそれぞれ入力情報から最大限の出力を作成するため、様々な有意な情報を作り出しているが、処理の過程で使用する情報や、入出力情報については、相互に利用しあう仕組みにはなっていない。最初のプロセス間の情報欠損は、CAD から CAM への情報である。CAD で作られた設計形状データや、要求精度および素材からの除去量の情報は、CAM で工具の移動経路である CL データ（Cutter location data）を生成するために使用されるが、CAM の出力情報には含まれない。次のプロセスは CAM から CNC への情報である。CAM は精度の高い NC プログラムを出力するために、加工する工作機械の機械構成や固有の制御パラメータを使用する。さらに最良の加工方法を選択

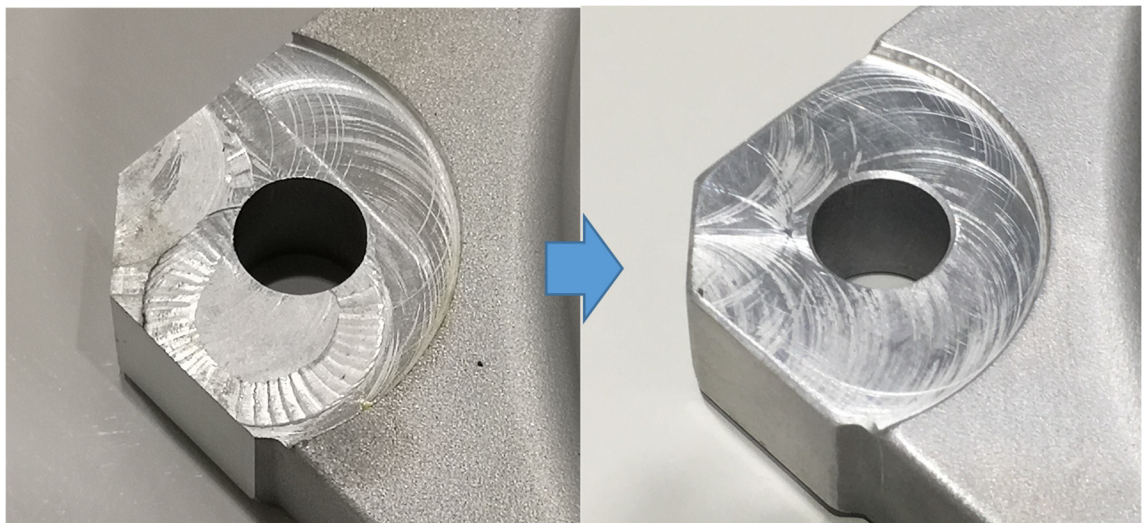
して工具経路と速度指令を生成する。どの加工方法を選択するかは CAM オペレータの知見や経験によって決められ、品質に差がでることがある。NC プログラムを作る際に使用された機械固有の制御情報や CAM オペレータの知見は、CNC には継承されない。

各プロセスで精度の高い出力を実現するために内部的に有意なデータを生成した場合でも、各プロセス間のデータのインターフェースが共通になっていないため、相互運用性が欠如しており、他のプロセスで利用されることはない。相互運用性の改善への提案として、製品モデルデータ交換規格である ISO10303 (STEP 規格) を使用する試みがされている。Valilai and Houshmand は、STEP 規格に基づいて CAD システムとシミュレーションシステムの相互運用を可能にする INFELT STEP プラットフォームを開発した。また、INFELT STEP プラットフォームは、CAD や CAM の異なるベンダー間の製品データを共同で交換して相互運用を可能にする取り組みをしている<sup>[9]</sup>。Wang らは、異なるベンダーによって提供される異なる CAD バージョンやシステム、ファイル形式の製品のデータ交換のために、STEP 規格の中立的な製品データフォーマットを使用して相互運用性とデータの移植性を実現する交換メカニズムを提案している<sup>[10]</sup>。Danjou らは、CAD から CNC への双方向情報の流れを実現するために、ISO14649 の STEP-NC 規格をベースに「生産エンジニアリングプロセスで製造から得られた製造知識をモデル化して構造化する方法」を提案し、上位の情報管理システム (PDM-MPM-ERP) を使用して知識の資産化を行おうとしている<sup>[11],[12]</sup>。

プロセス間に共通インターフェースを設定することで、そのインターフェース経由でいつでもどのプロセスからもデータへアクセス可能にできる。共通インターフェースとしての一つの提案は情報モデルを共有することである。設計段階から加工実行までより多くの情報を共有することで、各プロセス間での情報の欠損を最小化することが期待できる。STEP 規格は、グローバルなサプライチェーンも含めた製造業全般のデータ共有という全体最適化を目指すものである。加工のプロセスチェーンにおけるデータ共有には、加工データに密接した部分最適化の情報モデルが必要である。

### 1-3-3 経験・知見の継承問題

前述のように、CAM で作成される NC プログラムは、使用する設定条件や CAM オペレータの知見・経験に依存するため、出力される工具経路や速度指令は、担当した CAM オペレータの技量によって完成度に差異がでる。実際の加工現場では、機械オペレータが加工前に、工作物の取り付け、工具の選択という段取り作業を行った後、機械干渉の確認や加工時間を検証する目的でドライランという工作物を実加工しない空運転を行い、NC プログラムの妥当性を確認する。機械の動作状況を確認しながら、設計形状の要求仕様を満たすよう、機械オペレータによってプログラム指令速度や、使用する工具を変更する場合がある。NC プログラムの品質にばらつきがある場合でも、加工前に機械オペレータにより経験に基づく様々な改良が加えられている。さらに、加工終了後に加工面品位や加工時間を分析して、



Chattering

Apply know-how to reduce cutting load

Fig. 1-6 Processing applying processing know-how

問題を解決するために、または加工指令を改良する目的で、NC プログラムや加工条件に修正が加えられる。図 1-6 に、びびり発生による加工不良箇所を、機械オペレータが自己の経験から切込み量を小さくして切削負荷を下げる加工条件に修正することで、加工面が良品になった例を示す。

このように、加工現場では多くの機械オペレータが、NC プログラムの品質の向上や生産性向上を目的に様々な改良行動を行っている。しかしながら、加工プログラム・加工条件はその場限りの修正に留まり、他のプロセスとの改良情報の共有や、加工プロセスを遡って変更情報を反映されることは行われれないのが現状である。変更理由や加工結果との関係性を分析し共有化することは、以降の設計や、工程計画に反映することで、加工品質向上や生産性向上を可能にするが、現時点では加工現場で得られた膨大な知見は横展開されず、次の加工プログラム作成に活用されていない。Yamazaki らは、従来の CNC を拡張して、作業手順や NC プログラム、加工条件などをデータベース化して再利用するアーキテクチャの研究を行った<sup>[13]</sup>。篠木らは、プログラムの再利用という観点から、実績のある過去の加工操作データを利用して加工プログラムを生成する加工作業計画システムを提案した<sup>[14]</sup>。データの再利用性については多くの試みがあるが、評価に十分なデータを集める困難性などの諸理由から生産性向上の効果は限られていた。

加工現場で生成される有意な情報を CNC が有効に利用するためには、加工プロセスチェーンで生成される情報は他のプロセスと共通のインターフェースで表現されることが必要である。改良行動を共通のインターフェースで情報化することで、他のプロセスに継承して活用できる。加工現場の修正や改良情報が次の生産に活用され、そこで得られた情報がまた次の生産を向上させるという、情報の再活用の仕組みが必要である。

## 1-4 本研究の目的

そのような背景のもと、本研究では、加工プロセスチェーンの各プロセスのデータを共有することで、高精度加工と生産性を向上する新しい CNC を開発し、その有効性の検証を行うことを目的とする。

第 1 に、NC プログラムでは解決できない高速高精度要求に対し、他の加工プロセスがもつ情報を利活用することで解決できることを提案する。現在の加工プロセスチェーンは、中立的なデータフォーマットを使用したプロセス間のデータ交換は実用化されているが、データ共有化は実現されていない。設計プロセスである CAD と CAM に関しては情報共有が実用化されているものもあるが、設計プロセスと製造プロセスである CNC 間においては、他プロセスとの情報共有は実現されていないため、本研究において、CNC 主導でデータ共有の仕組みを作る。プロセス間において必要十分な情報を継承する必要性を認識し、他プロセスから CNC が継承すべき有意な情報を明確化する。第 2 に、加工実行した結果から創出される加工改良や問題解決に有用な情報を再利用することで、生産性を向上可能なことを提案する。現状の加工プロセスチェーンの情報は上流から下流への不可逆的な継承のみであり、プロセス間前後で活用されるようなサイクリックなデータ継承は実現されていない。有効に再活用できる情報を明確化する。

本研究では、データ共有により機能向上する新たな CNC として、加工プロセスチェーンの各プロセスの情報を共有し、他プロセスがもつ CNC が必要とする情報を利活用できる仕組みをもつ統合 CNC システムを開発する。第 1 段階は、統合 CNC システムの情報を共有する仕組みとして CAD, CAM と CNC の共有データベースを作成する。情報の相互運用性を実現するために共通のインタフェースとしてデータモデルを規定する。このデータモデルは構造化することで、編集や追加が容易となる。構造化は、情報を他プロセスから参照可能にするとともに、データベースに蓄積して再利用する形態に適している。第 2 段階は、同システムにおける、高速高精度加工の新たなアプローチとして、CAD の形状データを CNC が直接活用するデータ共有と活用のシステムを開発する。さらに、加工現場の知見やノウハウを利活用するためのデータの共有化と再利用可能な仕組みを開発する。第 3 段階として、統合 CNC システムの実加工セルを構築し、共有データベースと搭載するデータモデルの有用性、および現行の CNC に対する優位性を検証する。図 1-7 にその概念を示す。

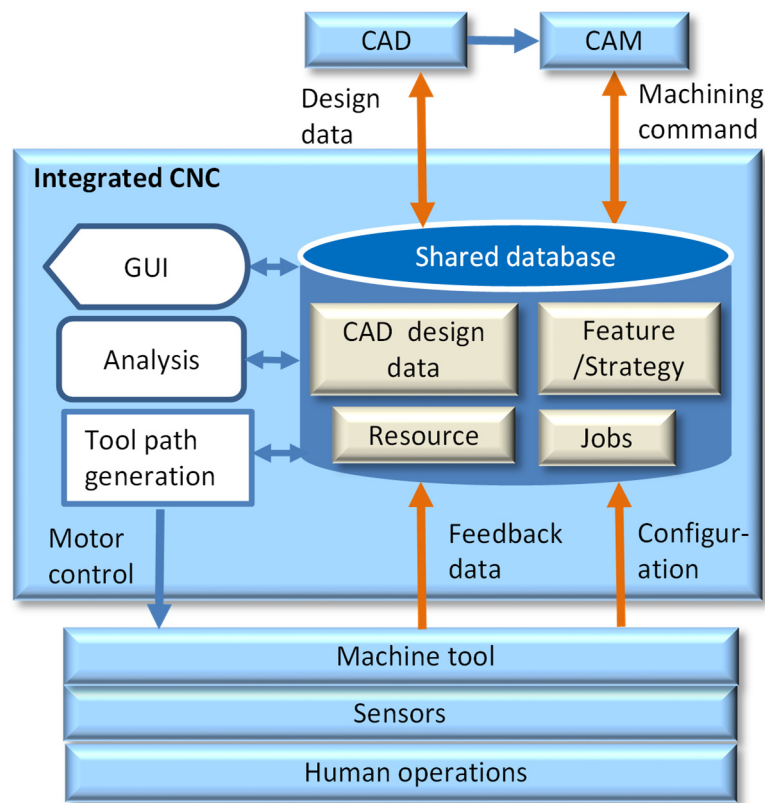


Fig. 1-7 Proposed Integrated CNC system

### 1-5 本論文の構成

本論文は本章を含み 6 章で構成される。

第 1 章では、CNC は NC 工作機械を制御することで高速で高精度な金属加工を行うという基本的な役割、および、製造業のデジタル化にともない、周辺機器も含めた情報端末としての役割が拡大していることを述べた。そのような環境下における高精度加工の課題として、NC プログラムの情報量が不十分であること、加工プロセスチェーンの情報の相互運用性が低いこと、加工現場のノウハウが再利用されないことを同定した。その解決案として統合 CNC システムの開発を提案し、本研究の目的と目標を述べている。

第 2 章では、NC 工作機械の成り立ちと、CNC はコンピュータ化されたことにより、制御の高精度化や知能化を達成してきた技術的發展について述べた後、ハードウェアやソフトウェア単体の機能強化だけではなく、多くの機器が相互に通信しあうデジタル製造業における CNC の今後の課題について考察する。

第 3 章では、本研究で提案し開発する統合 CNC システムの基本構造である、共有データベースと共通インタフェースとなるデータモデルが、CAD、CAM、CNC および工作機械の情報を共有し、相互運用性の低さや情報の再利用を改善することについて述べる。本研究



で独自に開発した加工指令は、CAD データのような他のプロセスの情報利用を可能とし、高精度な工具経路を生成する。実加工で得られる加工改良データを再利用可能とし、機械オペレータの加工の改善行動を蓄積して再活用することで生産性を向上する。共有データベースにより、加工プロセス間での情報の欠損を最小化し、共有した情報を有効活用できることを説明する。

第 4 章では、現状の NC プログラムに不足している情報を明らかにし、共有データベースにおける CAD の設計情報を活用して実現した CAD 情報を含む専用の加工指令と、CNC の制御アルゴリズムについて詳細に述べる。実際に NC 工作機械に実装して加工し、その有効性を検証する。CAD の設計形状の特徴点を認識して加工指令を生成することから、従来、工具軌跡の誤差要因であった速度制御の影響を排することができることや、CAD の設計形状を直接参照して指令点を補正することで、従来方法で生成した加工指令に比較して、設計形状データをより忠実に再現できることを説明する。

第 5 章では、実加工で得られた振動などの機械データと機械オペレータの経験に基づくノウハウや意図を共有データベースに収集し、共有データベースをもとに加工指令を評価指標に基づき改良し、より良い加工条件として再活用できるシステムを開発した。経験に依存せず高品質な加工指令を生成できることを確認し、未熟練オペレータでも熟練者と同等あるいはそれ以上の加工効率を達成する効果を検証する。

第 6 章では、本研究で得られた知見をまとめ、本論文の結論を述べる。

## 1-6 結言

本章では、CNC が NC 工作機械を制御することで、製造の効率化や高機能化に果たす役割と製造設備の技術発展への貢献について述べるとともに、高速高精度と生産性の向上を進展させる技術開発のためには、現状の CNC に、NC プログラムの情報量不足と、情報を得て再利用するシステムの欠如という問題が存在することを明らかにした。また、現在の加工プロセスチェーンには情報の相互運用性の欠如という根本問題があり、CNC が他のプロセスから情報を得ることの困難さを指摘した。CNC が他プロセスの情報利用を実現するために、共有データベースとデータモデルの構築という情報共有のプラットフォームの必要性を示した。共有データベースに加工プロセスチェーンで生成される情報を共有することで、CNC が CAD 情報を継承して利活用することや、CNC が取得する加工改良情報を再利用することの有意性を確認し、共有データベースをもつ統合 CNC システムを開発するという、本論文の目的を示した。

## 第 2 章 NC 工作機械の高度利用のための従来の試み

### 2-1 緒言

本章では、前章で述べた CNC が製造の効率化や高機能化に果たす役割と、製造業の技術発展への貢献について、CNC の発明による NC 工作機械の始まりと成長、および、その成長に貢献した CNC の技術成長の過程から説明する。工作機械を数値制御する NC の誕生は、金属加工を手仕事からプログラムによる自動加工へと転換させ、生産効率は飛躍的に向上し、製造業にパラダイムシフトをもたらした。コンピュータ化された CNC は、演算処理の高速化とともに、高精度、かつ高速に機械を制御する性能を高め、高速高精度加工の実現に貢献してきた。近年は、製造業のデジタル化と IoT の工場展開により新たな製造業のパラダイムシフトが進みつつある。生産環境が変化する中で、CNC の役割や技術展開について考察する。

### 2-2 NC 工作機械の始まり

1947 年にマサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology, 以下 MIT) サーボ機構研究所で、これまでの手動の工作機械に比較し、高い精度でかつ高い繰り返し精度で加工物を生産する目的で、数値制御の研究が開始された。航空機部品の自動加工を目指すアメリカ空軍から研究費の支援を受け、1952 年には図 2-1 に示すサーボ機構をもつ NC フライス盤 (米国シンシナチ・ミラクロン製) が開発された。同年に工作機械用数値制御装置 (NC) としてサイエンティフィック・アメリカン誌に、MIT の成果報告として発表された<sup>[15]</sup>。この成果報告は MIT レポートとして多くの研究者たちの注目を集め、数値制御が広く研究される端緒となった。現在広く普及している NC 工作機械に使用されているサーボ機構は、MIT でこの時開発されたサーボ機構の原理が現在も使用されている。CNC の基本特許は、1958 年に MIT の共同開発者であったパーソンズの特許が MIT に先んじて成立している<sup>[16]</sup>。

1956 年以降は、旋盤、フライス盤、マシニングセンタという工作機械が数値制御される NC 工作機械が次々と開発された。NC 工作機械はフライス盤からはじまったこともあり、右手直交座標系を基本として、XYZ 座標の 3 次元空間位置指令が普及した。工具移動と切込み方向移動という 2 軸制御である旋盤については、制御軸の軸呼称については統一されないまま市場に広がった。そのため、日本国内では工業技術院機械試験所の指導で NC 装置の軸の呼称の標準化が行われ、スピンドルに平行な軸は Z 軸、これに直角な軸は X 軸と決定し、以降この軸呼称が世界に普及した。NC 工作機械の軸呼称は、1963 年に、米国で NAS (National aerospace standard) 938 として規格化され、以降 EIA (Electronic industry

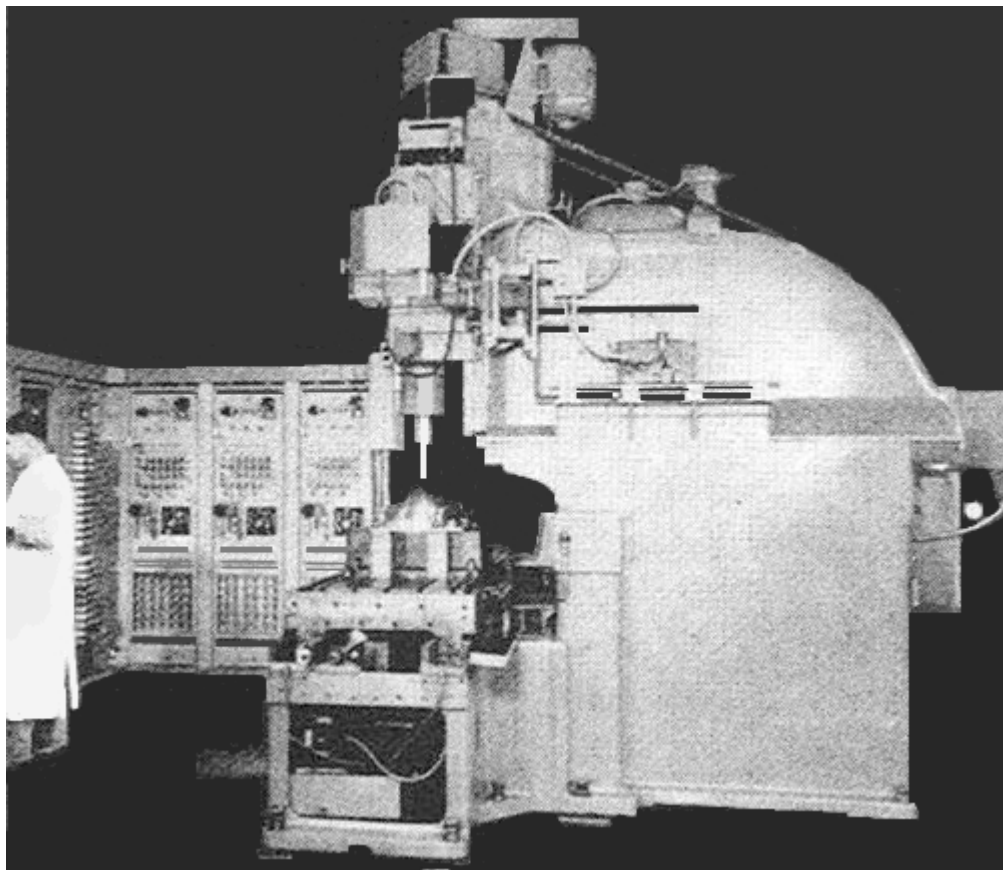


Fig. 2-1 World's first NC milling machine<sup>[17]</sup>

association) RS-267 としても規格された。国際的には 1968 年に ISO841 として規格化された。

自動車の大量生産用の工場では、専用の加工機を工程順に配置したトランスファマシンや、ロータリインデックスマシンが使用されていた。このような専用機が NC 化されたことにより、自動車部品を安定した精度で高速加工することが可能になった。生産効率が飛躍的に向上したことは製造コストの低減に貢献し自動車の価格に反映され、自動車の大衆化が進んだ。NC 工作機械は、自動車社会の実現に大きく貢献した。

高効率生産には工作機械の高速化が求められたが、切削速度の高速化が加工特性に及ぼす影響や工具磨耗の進行が早くなるといった問題が高速化を阻む要因となる。加工現象に関する研究により、切削速度増加と共に切削性が高まる現象が解明された。Schultz は特定の切削速度の範囲内で切削速度の上昇にともない面粗さが向上することを報告しており<sup>[18]</sup>、<sup>[19]</sup>、帯川は、切削の高速化で一定の速度まで工具寿命が改善される現象のメカニズムを磨耗機構の切削速度依存性により明らかにした<sup>[20]</sup>。工作機械の高速化は、機械に加えて工具や被作材の研究と共に実現された。

2000 年代には、フライス盤や旋盤、研削盤というように従来は単独で用いられてきた加

工機を、1台の工作機械に複数搭載した複合加工機が一般化した。機械や CNC の高機能化に伴い、従来は集約が困難とされてきたレーザ加工などの特殊機能も搭載されるようになり、工程集約が一段と進化した。

工場にネットワークが導入されると、それまで人手で集計されていた工作機械の生産指示や稼働状況の監視、加工部材の投入がホストコンピュータで集中管理されるようになった。ネットワーク化されることで、NC 工作機械と周辺装置間も通信可能になり、産業用ロボットと工作機械をシステム化することで、ロボットによる加工部材のロード・アンロードが普及し、工作機械を含む生産工程の自動化が進んだ。近年は、ネットワークを介して機械同士がコミュニケーションをとることで、集中管理に加え、製造現場にある設備自身が自律的に予防保全や故障診断が行えるシステムも実用化されている。IoT の普及によって、NC 工作機械の機械状態や加工状況をリアルタイムで取得することで、遠隔地においても機械保守や操作が可能である。工場の生産環境がコンピュータ化される OT (Operation technology) と IT が融合することで、生産と管理が遠隔地に立地することを可能にした製造のグローバル化が広がっている。

世界の工作機械生産高は 2014 年に \$ 81.2 billion ( US ドル) となる大きな産業に発展した<sup>[21]</sup>。2018 年は、\$ 91.8 billion ( US ドル) と成長が続いている<sup>[22]</sup>。工作機械の国別生産高は、1980 年まで米国が 1 位であったが、その後 2008 年までは日本が 1 位となり、2009

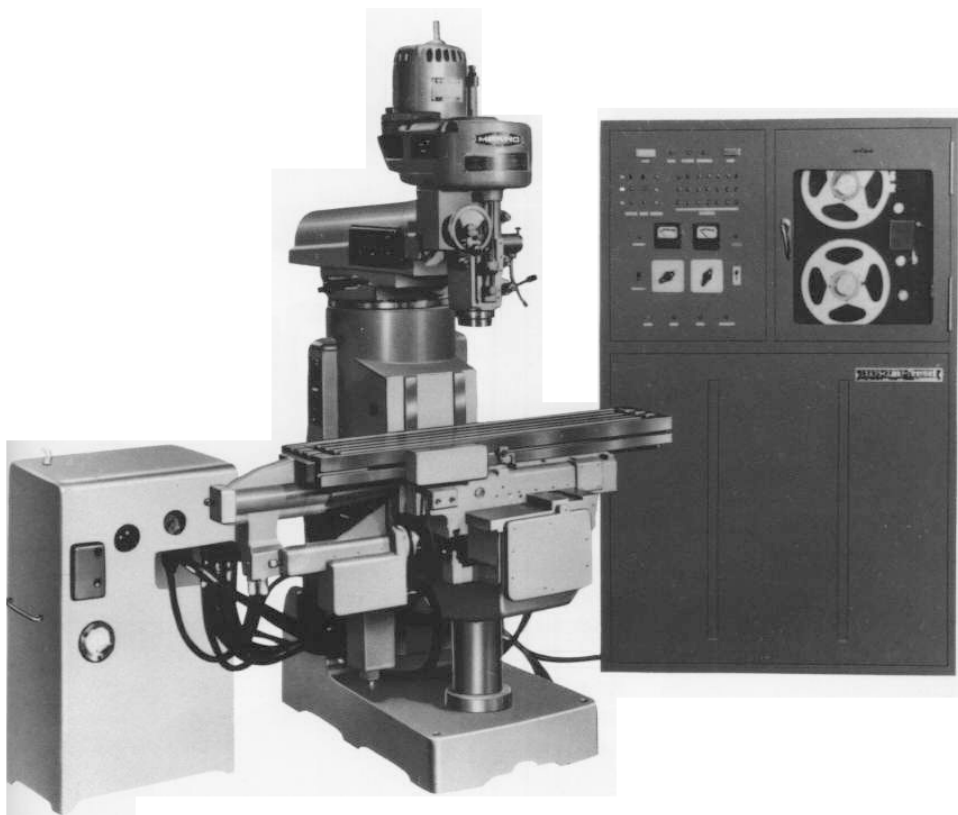


Fig. 2-2 Japan's first NC milling machine<sup>[23]</sup>

年以降は中国が 1 位となった。工作機械の主要生産国は、最大需要先である自動車産業の主たる生産集積地の広がりと共に変遷している。

日本でも多くの技術者が前述の MIT レポートに触発され、開発に着手した。1957 年に牧野フライス精機のフライス盤に富士通（現ファナック）の NC を組み合わせた NC 工作機械が国産第 1 号として商品化された（図 2-2）。1959 年の東京見本市において、NC 工作機械が初展示されたが、その後出展数は増加を続け、2018 年の日本国際工作機械見本市（JIMTOF2018）では 473 台が出展されたように、NC 工作機械は産業として大きく成長した。日本の工作機械生産高における NC 装着率を示す NC 化率は、1990 年頃には 70% を超え、2014 年には 90% を超えている<sup>[24]</sup>。日本の工作機械産業は、他国に比較して NC 化率が極めて高いという特徴がある。日本では、製造業は GDP の 21% を占める<sup>[25]</sup>重要な産業である。工作機械は、製造の自動化に加え、高速高精度化という大量生産や付加価値を高める技術で製造業を支えてきた。

### 2-3 CNC の発展

1952 年に開発された MIT の NC は、250 本の真空管と 175 個のリレーを使い、可動部品も多いというきわめて複雑な機械であった<sup>[15]</sup>。それ以降 NC は、トランジスタ、マイクロプロセッサという電子技術の最新技術を取り入れながら高度化、小型化した。本節では、CNC 専門メーカーの一つであるファナック株式会社の NC 装置の発展について述べる。なお、同社は 1972 年に富士通株式会社より独立している経緯から、1972 年以前については富士通と表記し、1972 年以降はファナックと表記する。

日本における本格的な NC は 1957 年に開発されたハードワイヤードの NC である。富士通製磁気テープに記録したパルス列を読み取り、油圧サーボシリンダを駆動してフライス加工を行った。演算処理にはミニチュア真空管を用いたフリップフロップの電子回路ユニットを使用した。フライス盤に搭載した最初の商用 NC 装置として、三菱重工業や富士重工業（現 SUBARU）などに納入された。

1959 年には、稲葉らは、入力する電気信号のパルス周波数に比例した速度で回転する電気パルスモータの出力を増幅するため、油圧モータでトルクを増幅する、オープンループ方式の電気・油圧パルスモータ（図 2-3）を開発した。同時期に東京大学と共同で、NC の基本機能である直線補間と円弧補間を工具径補正して計算する、代数演算方式パルス分配回路という NC 専用コンピュータ回路を開発した<sup>[26]</sup>。鑽孔テープの数値指令に基づき、円弧と直線で構成された形状の工作物を加工でき、手作業で加工する事が困難な形状の加工が自動化された。同時に、演算素子をトランジスタに置き換えることにより、真空管の交換にかかる労力を排除し、故障率を大幅に削減した。

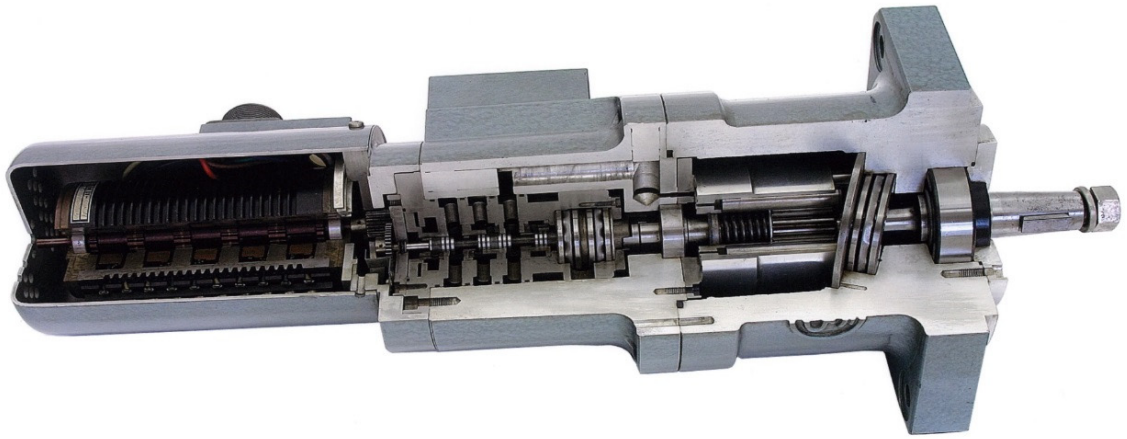


Fig. 2-3 Electric / hydraulic pulse motor<sup>[27]</sup>

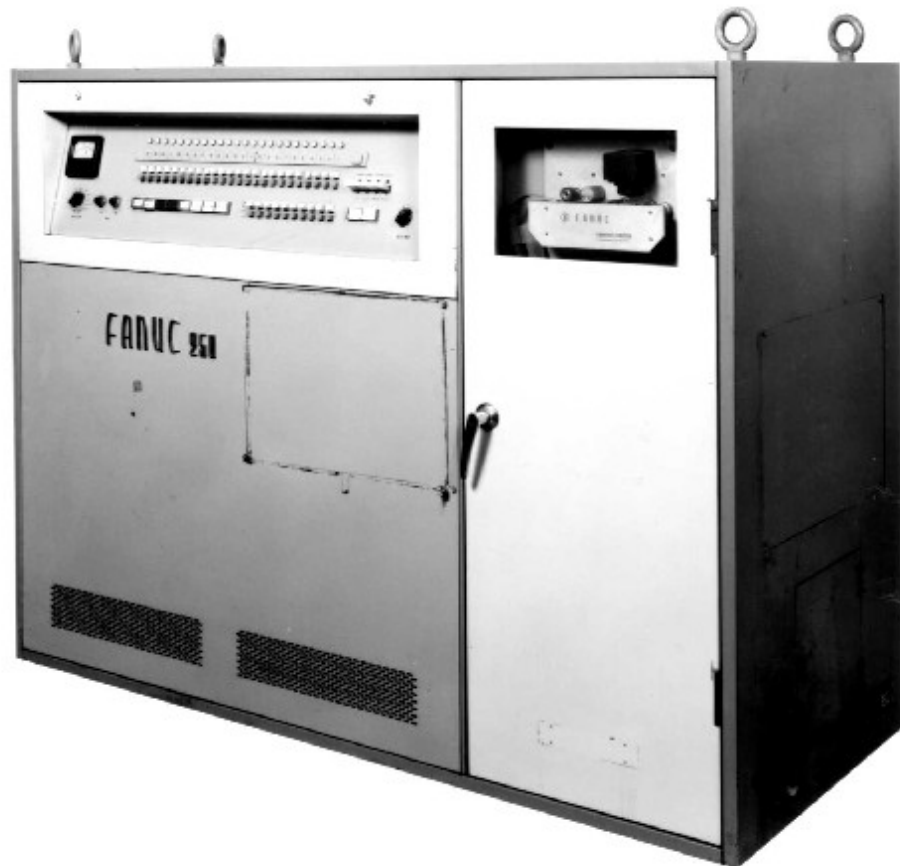


Fig. 2-4 First computerized NC (FANUC250a) <sup>[28]</sup>

富士通が1969年に発表したミニコンピュータ FACOM R は、サイクルタイム  $1.5 \mu\text{s}$  のコアメモリを主記憶装置とし、16ビット加減算速度が  $6 \mu\text{s}$  という性能であった。同年、このミニコンピュータを組み込んだ NC (FANUC250a) が最初のソフトワイヤードの NC であり、これが CNC の始まりである (図 2-4)。1972 年に発表した後継機は、記憶メモリにバックアップ電源不要のコアメモリを使用したことで、コンピュータ上でプログラム編集が可能になった。コアメモリ搭載前は、プログラム修正のたびに紙テープを穿孔する必要があったが、プログラムの実行ではテープリーダに比べて読み取り速度や信頼性が格段に向上した。また、ハードウェアは共通で、ソフトウェアの制御プログラムを入れ替えることにより、ミリング系、旋盤系、専用機械系という各種の機械に対応する初めての CNC であった。

1973 年には、第一次オイルショックが発生し、電力効率が求められるようになったため、ファナックは米国の Gettys 社とライセンス契約を結び、DC サーボモータの技術を導入した。同時に、同社は独自に DC サーボモータ技術をスピンドルモータに応用した。DC スピンドルモータは、ステータの磁極に巻線を使用していないため、当時主流だった無段変速の直流電動のスピンドルモータに比較して、同一トルクでは圧倒的に外形寸法の小型化を実現した。

半導体技術の目覚ましい進歩により、マイクロプロセッサや半導体メモリが比較的安価に市場に供給されるようになると、1975 年に AMD 社のプロセッサ Am2901 を組み合わせて独自の CPU を設計した。1976 年には本格的にモトローラ社のマイクロプロセッサ MC6800 (8 ビット) を採用し、制御プログラムの格納先には紫外線を照射して記憶内容を消去し書き込みが可能となる EPROM を、加エプログラムやパラメータの格納先はバッテリーバックアップされた CMOS メモリを使用した。1978 年に発表された初の 16 ビットのインテル製のマイクロプロセッサ i8086 を 1979 年に採用した。加エプログラムやパラメータの格納先としてバブルメモリを初めて採用し、バックアップ電源不要になった。また表示装置として CRT (Cathode ray tube/ブラウン管表示器) を搭載し、プログラムの編集や加工実行の状態監視における操作性が格段に向上した。

NC 工作機械の普及に伴い、DC サーボモータの消耗部品であるブラシの保守負担が重くなったため、1982 年、ロータにフェライト磁石を組み込んだ同期電動機タイプの AC サーボモータが開発され、DC サーボモータから全面的に切り替えられた。1987 年には、エネルギー密度が高い希土類磁石が実用化されネオジ鉄磁石を採用した AC サーボモータが開発された。

1988 年 CNC の高速演算を実現するために、CNC 用プロセッサとして 32 ビットマイクロプロセッサを採用した。情報の伝達路である CNC バスを 32 ビット化するだけでなく、内部バスに接続されたプロセッサ相互間で自由に情報の伝達がおこなえるよう独自に開発したマルチマスタバス (F-BUS) を採用することで、システムの拡張を可能にした。この構造は現在も CNC の基本形である (図 2-5)。性能としては、 $0.1 \mu\text{m}$  の精度で  $24 \text{ m/min}$  の

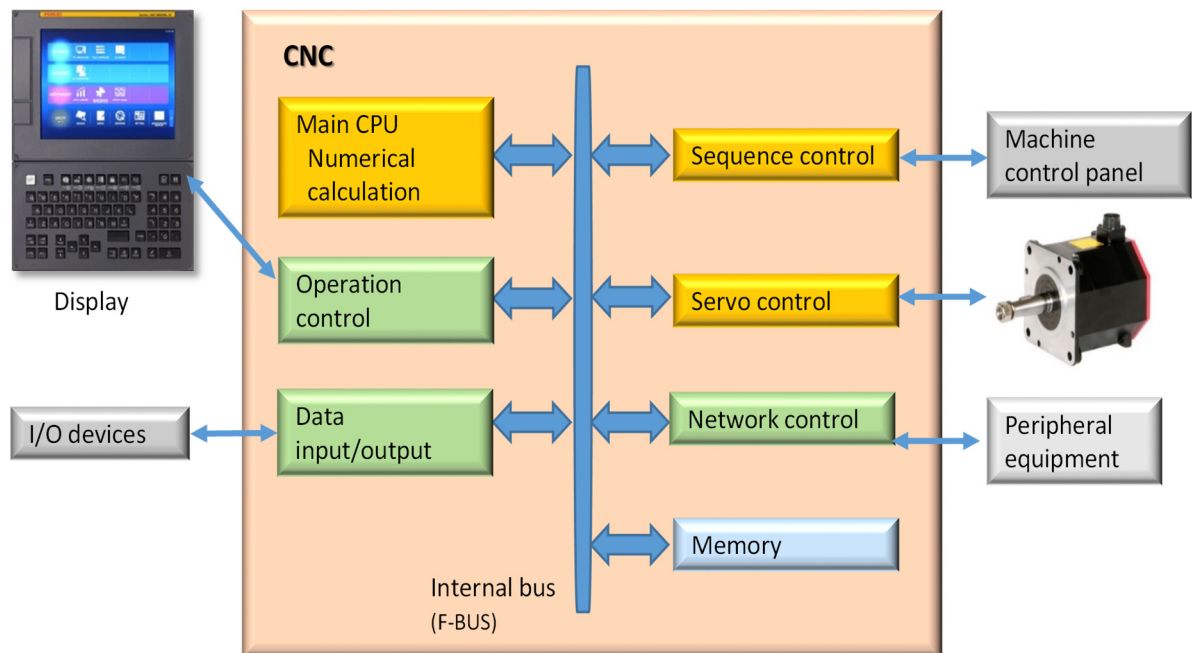


Fig. 2-5 Basic structure of CNC

切削送りや、1 mm の連続した指令ブロックを 30 m/min の切削送りで加工できる高速加工を実現した。

当初、CNC からサーボへの速度指令をアナログ電圧で出力し、サーボアンプのアナログ回路で PID 制御 (Proportional-Integral-Differential Controller) でサーボモータを駆動するという構成のアナログサーボシステムであった。1988 年、サーボ演算は CNC に装着したテキサス・インストルメンツ (Texas Instruments Inc.) 社の DSP (Digital signal processor) が行い、CNC からサーボアンプへの出力はサーボモータへの電流指令をデジタル出力するというデジタルサーボシステムを開発した (図 2-6)。DSP を実際の量産システムに適用した世界初の例であった。これ以降サーボアンプは CNC からの電流指令に従ってサーボモータを駆動するパワーを制御するパワーアンプとなり、1 本のシリアルサーボバス (FSSB) が CNC から複数台のサーボアンプをシリアル接続するというシステム構成が現在も続いている。

ミリ秒単位で複数の軸を制御することや、誤動作による不良品の産出を避けるために、CNC は安定動作と機械的正確さ、および耐環境性に代表される信頼性という特質が最重要視される。この特質を実現するため、CNC は独自の専用ハードウェアとソフトウェアを開発することで成長した。近年は、前節で述べたように NC 工作機械のネットワーク接続や IoT 対応、また、セキュリティ技術の汎用化から、PC (Personal computer) を CNC が積極的に活用するようになってきた。CNC に PC を直接搭載する技術や、ネットワーク経由で PC に接続する技術が普及することで、市販の PC 用ソフトウェアや測定器メーカーが提供する計測機能を幅広く活用することができる。モーション指令、安全制御といったリアルタ



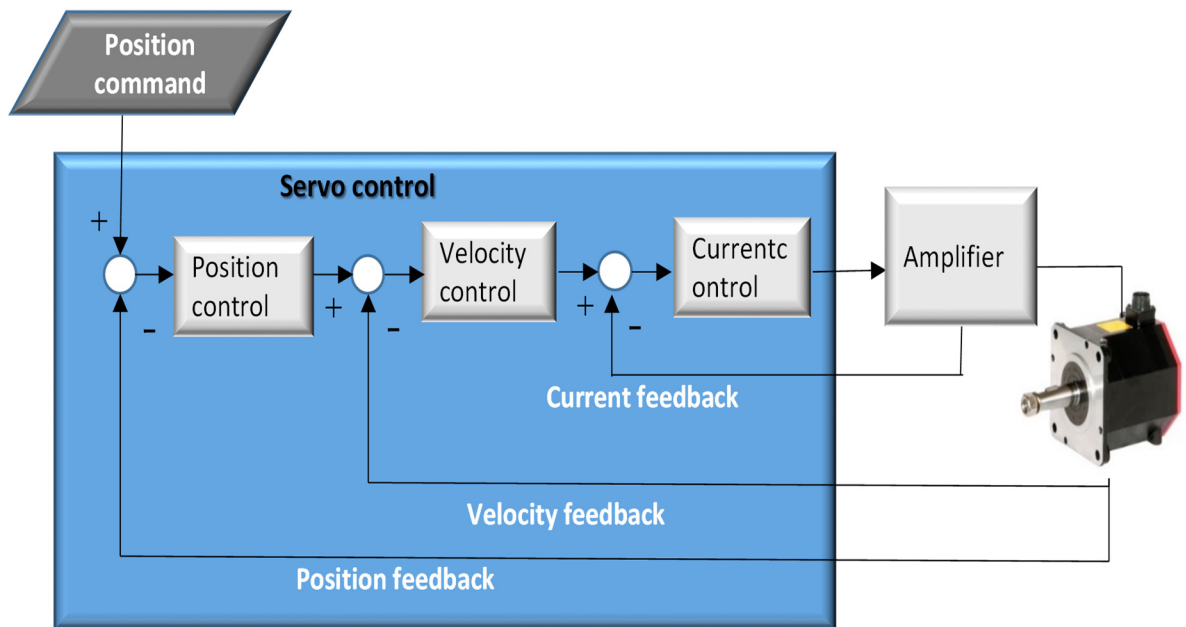


Fig. 2-6 Basic structure of digital servo system



Fig. 2-7 Latest CNC (FANUC Series 30i-Model B) [29]

タイム処理が必要な機能は専用 LSI で CNC が制御し、遅延が許される処理やバッチ処理は汎用 PC が分担することが基本的な役割であるが、リアルタイムの高精度シミュレーション機能など、CNC と PC の機能が高度に融合する機能が年々増加している。

図 2-7 に CNC の最新モデルを示す。図 2-1 に示す世界初の NC や図 2-4 に示す世界初の CNC に比較して、劇的に性能比サイズが小型化し技術が進化したことがわかる。

## 2-4 CNC 指令の変遷

### (1) NC 自動プログラミング言語

NC が開発された当初、NC プログラムは、工作機械の刃物や加工物の位置や移動の指令を数値で表現し、入力媒体の紙テープ（図 2-8）に鑽孔して NC 装置に入力した。すべての作業は人手で行われるため、プログラムを作成するのに長時間を要していた。1956 年 9 月、MIT サーボ機構研究所は、同時 3 軸以上の工作機械を制御するための位置と移動を指令する輪郭制御用の NC 自動プログラミング言語 APT (Automatically programmed tools) を開発した。APT は、人が会話で用いる単語（英語）からなるプログラム言語で、複雑形状を加工するプログラムをコンピュータで生成できるようになった。APT は直線移動のみの制御であったが、2 次元形状用 APT-II に拡張され曲線を指令可能になった。1961 年には曲線を加工できる 3 次元形状用 APT-III が開発された。NC 工作機械黎明期には、工作機械メーカーが自社製の NC を開発していたため、NC への指令モデルは統一されておらず、機械ごとに専用の NC プログラムが必要とされていた。APT は汎用的なプログラミング言語として開発され、APT で作成したプログラムを翻訳して刃物の移動軌跡を計算し、各社の NC モデルに変換する専用ポストプロセッサが開発された<sup>[30]</sup>。

1966 年アーヘン、ベルリン、シュツットガルトの 3 大学を中心としたグループは、APT を発展させた NC 自動プログラミングシステム EXAPT (Extended subset of APT) を開発した。幾何学的な定義方法は APT と同様であったが、切削条件や工具の自動選択といった切削加工の自動決定技術が追加された。1974 年には EXAPT1.1 としてバージョンアップし、マシニングセンタ用自動プログラミングツールとして利用されるようになった<sup>[31]</sup>。

APT/EXAPT は大型コンピュータで運用されたため、コスト運用面の理由から航空機や造船、自動車産業などへの導入に限られていたが、ミニコンピュータの普及に伴い、多くの企業が独自の APT ベースの自動プログラミング言語を開発した。日本ではおもに造船工場向けと一般工場の工作機械用の 2 つの市場向けに複数の自動プログラミング言語が開発された。1964 年に富士通が開発した FAPT 言語、日立製作所の HAPT 言語など次々に実用化された<sup>[32]</sup>。NC 工作機械で加工する形状が複雑になるにつれ、自動プログラミングの需要が高まったが、1976 年にファナックが持ち運び可能な卓上自動プログラミング装置 (SYSTEM-P) を開発したことで、中・小規模な工場においても、自動プログラミング装置の普及が急速に進んだ（図 2-9）。

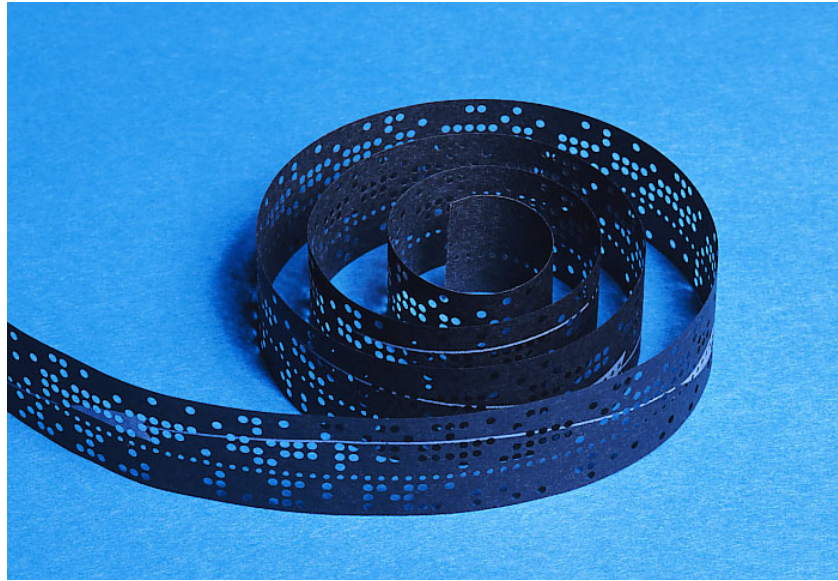


Fig. 2-8 Punched tape<sup>[33]</sup>



Fig. 2-9 Portable automatic programming system with punched tape reader<sup>[34]</sup>

専用のコンピュータが必要であった自動プログラミングツールは、CNC の処理能力の向上によって、CNC にプログラム編集機能として搭載されるようになった。形状を現すシンボルを連続的に指定することで、加工する輪郭形状を指令する自動プログラミング操作系を利用して、専用のコンピュータを必要とせず、複雑なプログラムを CNC で直接作成できるようになった。CNC の自動プログラミングツールは対話型操作入力と呼ばれ、CNC メーカーごとに特徴ある操作系が開発され、自動プログラミングツールの需要は減少した。また、以前は高性能なワークステーションが必要であった CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) は、PC の性能向上により、多くの CAD/CAM メーカーが PC ベースのソフトウェアを開発したことにより、オフラインでの NC プログラムの作成は、現在では自動プログラミング装置に替わり CAM が主流となっている。

## (2) G コード

CNC で最も多く使用されている NC プログラムは、G コードと呼ばれる機械の動きを指令するコードの組み合わせである。G コードは、各駆動軸の動作指令をアルファベットと数字の文字列で構成されるコード体系で記述することで、座標と動作を表現している。アルファベットの G は基本的な位置決めと直線補間、円弧補間から、工具補正や固定サイクル、ワーク座標系、サブプログラムという機械制御を指令する。G にともなう数値は、移動先の座標と移動速度や回転数を表わし、工作物の位置決めや方向指定など座標系の準備機能や、主軸移動などの動作を指令する。アルファベットの M は工具交換やクーラントという機械動作を指示する補助機能と決められている。M にともなう数値は動作の種類を指令する。現在位置から指定された位置までの移動を表すプログラムの 1 ユニットをブロックと呼ぶ。CNC はブロックごとに逐次制御する場合もあるが、当該ブロックの実行に先立って複数ブロックを事前に先読みして解析し、前後のブロックの工具経路と速度に大きな変動が発生しないよう制御している。

NC への指令として G コードをいち早く採用したのが富士通 (現ファナック) であった。その後ファナックの NC が世界的に普及したことに伴い G コードプログラムも普及し、すべての NC で使用できるようになった<sup>[35]</sup>。NC 工作機械の普及が進むにつれ、ユーザは工場に複数の機械メーカーの NC 工作機械が混在しても、G コードを使用できればすべての工作機械メーカーの NC プログラムを作成できる。さらに他の工作機械のプログラムとして流用が確実に行えるという省人化・省力化の効果が明確であったため、G コードは規格化された。1960 年代より、NC 工作機械用の簡易的な言語として利用されていた G コードは、1979 年に EIA RS-274-D としてアメリカで規格化された。1982 年には欧州規格で ISO6983 として制定された。日本工業規格 (JIS) の G コード規格 JIS B 6315-1/-2 は ISO に準じている<sup>[36], [37]</sup>。

近年工作機械にくわえて、産業用ロボットや 3D プリンタ、レーザ加工機といった工作機械の周辺機器を G コード指令で制御できるようになってきた。元来それぞれ専用のプログラ

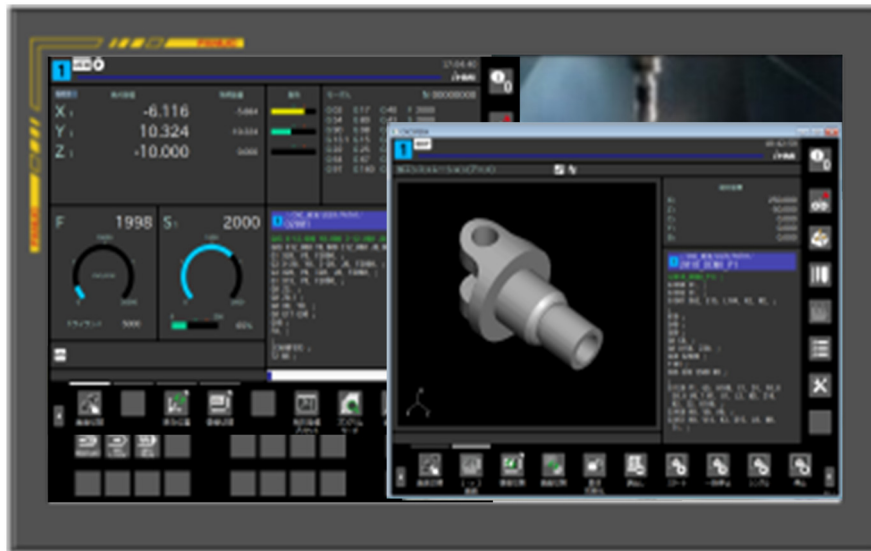


Fig. 2-10 CNC machining simulation (FANUC Series 30i-Model B) [38]

ミング言語やプログラミングツールを必要としていたが、Gコード指令が汎用化されると、Gコードに習熟した機械オペレータが、CNCのプログラミング言語で周辺機器を操作できるという利点がある。また、切削シミュレーションは、高速な演算処理能力と、高精細な表示器が求められることから、グラフィックエンジンを搭載したコンピュータ、おもにはCAMの機能としてCLデータを解析することで行われてきた。CNCの演算処理能力の向上に伴い、近年はGコードを直接解析してCNC上でシミュレーションすることが可能になった(図2-10)。加工実行中にリアルタイムでシミュレーションし、切削負荷を予測して工具折損を回避することが可能になった。さらに、同時に3次元干渉チェックを行うことで、機械要素同士や工具の衝突検知するために使用されている。

### (3) STEP-NC

Gコードは現在で最も広く使用されているNCプログラムであるが、工作機械の動作がコードに分解されて記述されているため、製品のどの部位をどのように加工するかという加工工程とNCプログラムを対応付けすることが困難である。また、機械メーカーごとに補助機能を設定しているため、補助機能を共通化できないという問題点がある。それを解決する目的でNC指令の新しい国際規格としてSTEP-NCが提案された[39]。STEP-NCは、CAD/CAMシステムとCNC工作機械とのデータ受渡しに関する新しいモデルを規定し、工作機械の動作を記述する方式から、オブジェクト指向の概念に基づく加工作業を用いて加工工程を記述する方式とした。加工作業とは、高水準の加工形状特徴をこれに関連する工程パラメータに対応するものである。CNCはこの加工作業を、工作機械の軸移動と工具動作に変換する役割を担う。

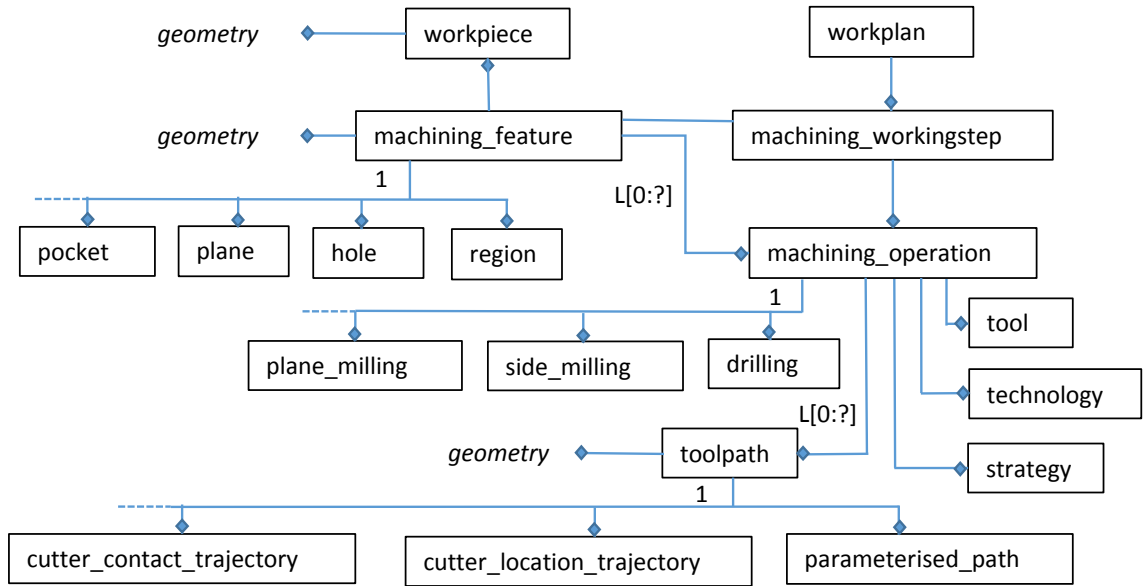


Fig. 2-11 Data structure of STEP-NC<sup>[41]</sup>

STEP-NC は、ISO 14649 として加工情報を STEP 規格の加工形状特徴モデルに準じる CNC データモデルとして記述するために、STEP 規格から独立して規定された<sup>[40]</sup>。STEP 規格は、生産に関する製品情報データの交換と共有化のための標準情報モデルとして 1994 年に国際規格 ISO 10303（通称 STEP 規格（Standard for the Exchange of Product Model Data））が制定された。この規格では、CAD と CAM 間のデータ交換では、製図や加工形状特徴モデルを含む形状情報に加え、製品モデル全体を対象とした中間フォーマットを国際標準情報モデル化し、ベンダー間のデータ交換を可能にしている。STEP-NC で記述する加工情報は、以下の 3 つの情報で構成されている。①対象とする加工部位の仕様を加工形状特徴モデルとして記述する。②加工部位の加工に必要とされる加工作業とその順序を、加工プロセスモデルを用いて記述する。③各々の加工作業の詳細な内容を、規定している加工プロセスモデルを用いて記述する。坂本は図 2-11 に示すように ISO 14649 のデータ構造の概要を図式化した。Workplan は、NC プログラムの単位であり、その下に Workingstep（加工作業）をもっている。Workingstep は、対象とする加工形状特徴（Machining\_feature）および加工作業内容（Machining\_operation）を属性としてもっている<sup>[42]</sup>。

加工プロセスチェーンの CAD と CAM 間の STEP 規格のデータ交換は普及しているが、CAM から CNC へのデータ交換の STEP-NC は、STEP-NC データモデルを出力する CAM や、データモデルを入力データとして加工実行できる CNC が商品化されておらず、現時点で普及は進んでいない

#### (4) CAM

CAMは、CADソフトウェアで生成された製品データをもとに、NC工作機械を駆動するための加工情報としてのNCプログラムを作成するプログラミングツールである。複雑な三次元形状加工を実行できる工作機械の登場により、CNCは多軸加工や複雑形状の加工機能など、多彩な制御が可能になった。それに伴い、NCプログラムは複雑さを増し、人手による作成は困難な場合がある。複雑なプログラムは、オフラインでCAMを利用してプログラム作成することが普及した。

CAMは、CADで設計された形状に対し、使用する工具、工具で切削する方向や深さを決める加工戦略、加工速度という情報を設定することでCL (Cutter location) データという工具の軌跡情報を作成するメインプロセッサと、使用する工作機械の仕様や切削条件などの制御パラメータを設定することでNCプログラムを作成するポストプロセッサで構成される。ポストプロセッサはCLデータをGコードに変える翻訳機である<sup>[43]</sup> (図 2-12)。

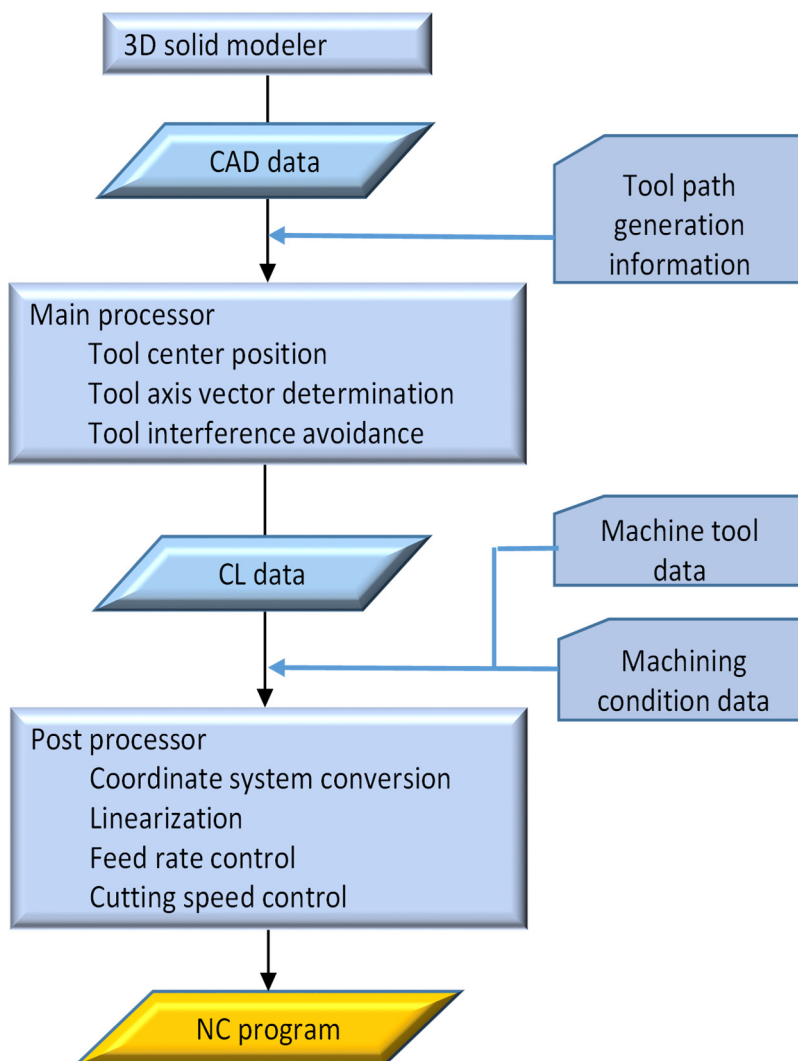


Fig. 2-12 CAM structure

NCプログラムの自動プログラミングツールとしては前出のAPTが起源といえるが、専用コンピュータが必要とされたAPTに対し、CAMはワークステーションやPCソフトウェアとして実用化された。CAMはCLデータ作成というAPT機能を継承していることに加え、加工順序や使用工具を自動決定する機能をもつが、2.5次元や3次元形状加工の場合には、CAMオペレータが介在し、その経験や技能によって加工戦略に影響がある。吉川は、CAD/CAMが普及しても、加工条件など自動決定できない部分は人が介在し、自動化の余地を残す問題点を指摘している<sup>[44]</sup>。

## 2-5 CNC機能の発展

CNCに搭載されるCPUの処理能力の向上にともない、制御系統数や制御軸数が増え、複雑な機械構造の工作機械を1台のCNCで制御できるようになった。プログラムの指令単位であるブロック処理時間が短縮し、指令単位の分解能も向上することで、高速高精度制御が実現されている。さらに、AI機能を搭載することで、従来、機械設計で吸収してきた工作機械の運動による熱変位を、ソフトウェアとして補正できるようになった。本節では、CNCの代表例として、ファナック株式会社のCNCの機能の進化について述べる。

### (1) 補間

NCの基本機能である直線補間と円弧補間は、1959年に代数演算方式パルス分配が開発され、直線の進行方向の左右や円弧の内外を判別しながら工具経路を指令できるようになった。1963年に、フライス盤などのXYZ軸の3軸の工作機械を対象に、直線・円弧補間と工具径補正機能を持ち、補間と径補正はXY、YZ、ZX平面のいずれかを任意に選択できる現在の補間の基本形が開発された。3次元の複雑な形状を加工するためにはXYZ軸の直線軸とXYZ軸の回転軸であるABC軸の6軸を同時に制御することが必要とされる。現在は直線3軸と回転2軸を同時に補間する5軸制御が普及し、被削物を工作機械に一度取り付けると、段取り替え無しで、これまでは工程分割が必要であった複雑形状や自由曲面を加工できる。

### (2) 制御系統数と制御軸数

1965年には同時3軸制御つまりXYZ軸の同時補間機能が開発され、それまでの2.5次元加工から3次元加工が可能になった。以降CNCの性能向上に伴って、同時制御軸数は増加を続け、2003年には24軸を同時制御するCNCが開発された。系統とは、主軸または刃物台を基準としたひとつの制御単位である。系統ごとにミリング機能、旋盤機能やローダ機能を独立、または、同時に制御する。現在は1台のCNCが制御可能な制御系統数は、最大10系統まで拡張できる。多軸多系統CNCは、複合加工機や複数の加工ステーションをもつロータリインデックスマシン代表される特殊構造の機械制御に使用されている。



### (3) 複合化

1972年には、ハードウェアが共通で、ソフトウェアの制御プログラムを変えることにより、異なる種類の工作機械に対応できる CNC が開発された。2003年には旋削機能、フライス機能、研削機能、さらにレーザ加工など異なる種類の機能を1台の CNC で制御できる複合化技術が完成した。フライス工具で旋削加工する加工方法が実現されるなど、複合化技術は進化している。旋盤の旋削機能とフライス盤のミリング機能では、指令される G コードは EIA/ISO で別のコード体系として規格化されている。さらに、加工種類によって使用する工具種類が異なるため、加工種類ごとに工具補正方法がある。複合加工機用の CNC は、機械構成によって、前述のように系統ごとに加工種類を選択する機能や、旋盤系統でミリングの加工指令を行えるといった柔軟なプログラム指令を可能にすることで実現した。製造現場では、自動化や省人化目的で工作機械と産業用ロボットのシステム化の事例が増加するにともない、CNC の系統のひとつをロボット専用割り付けて、ロボットを G コードプログラムで制御することが普及している。

### (4) 加減速能力

1970年に、ミニコンピュータを採用することで、ソフトウェアによって補間機能が実現された。多ブロックを加工実行中に先読みして各軸の補間前に加減速することで軌跡精度を向上させる加減速を実用化した。現在でも補間前と補間後に加減速演算を行うのが加減速制御の基本形である。機械駆動部の性能向上で高速運転が可能となり、また、CNC の演算処理能力も向上したことから、2003年には、先読みブロック数は1000ブロックまで拡張された。多ブロック先読みによる速度制御をおこなうことで、急激な加減速による機械ショックや振動を抑制し、微小線分による自由曲面形状でも高い面品位の正確で安定した高速加工を実現している。

### (5) 分解能

現在の CNC は、1  $\mu\text{m}$  単位の位置指令であっても、CNC 内部では1 nm 単位で演算処理することで高精度補間を実現している。補間の単位が極めて小さくなったことで、機械が滑らかに移動でき、加工精度が向上した。ナノ加工機と呼ばれる超精密加工機は、指令単位は0.1 nm まで微細化している。この場合には、CNC の演算処理を1 pm で行うことにより0.1 nm の精密補間を実現している。図 2-13 に、指令単位1 nm のプログラムを超精密加工機で加工した例を示す。時計部品のベゼルのフライス加工面は1.1 nm の面粗さを実現している。文字盤の1  $\mu\text{m}$  ピッチホログラムの加工技術は、時計文字盤の意匠として採用されている。

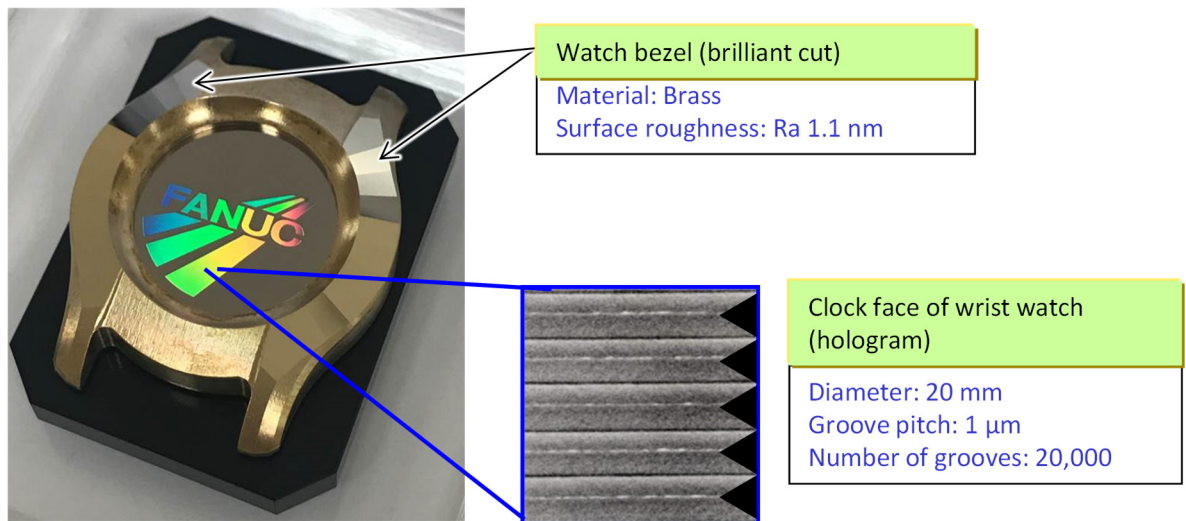


Fig. 2-13 Ultra-precision machining of watch parts<sup>[45]</sup>

#### (6) 演算処理能力

CNC 演算処理能力は、微小な移動量の指令が連続しているプログラムを、可能な限り高速で、途切れなく処理するために重要な性能である。この性能の評価指数として、1 mm 長の XYZ 軸同時 3 軸直線補間の 1 ブロックの指令を読み取り、実行形式のデータを作成するための時間である BPT (Block processing time) が用いられる。1988 年、CNC の高速演算を実現するために、CNC 用プロセッサとして 32 ビットマイクロプロセッサを採用した BPT は 20 ms であった。1996 年は、演算処理専用 RISC プロセッサを搭載することで BPT は 1 ms に高速化し、2003 年には新 CPU を採用して BPT は 0.4 ms まで短縮された。

#### (7) 知能化

高速高精度加工には、機械性能を最大限に発揮しつつも機械ショックが発生しないインテリジェントな加減速技術が重要である。2000 年に初の AI 機能である、AI 高精度輪郭機能が開発された。NC プログラムを多ブロック先読みして分析し、機械仕様として設定されているコーナでの許容速度差、曲線部分での許容加速度、許容加加速度（加速度の微分）を超えない範囲で、速度変動を小さくする最適速度制御パターンを探索する機能である。これは、人間の知識をデータベースとしてルールベースで答えを探索するため、処理できるレベルや機能の及ぶ範囲によって松尾らが AI を 4 つのレベルに分類した中の AI レベル 2「振る舞いのパターンが極めて多彩なもの」に相当していた<sup>[46]</sup>。

2017 年以降は、AI を活用した CNC の機能の開発が続いている。NC 工作機械に装着した複数個のセンサ情報から機械の熱変位モデルを探索する熱変位補正機能は、機械運動の発熱の影響を動的に最小化する。機械学習を利用した AI レベル 3 相当の機能である。小型マシニングセンタで効果を確認した結果を図 2-13 に示す。また、主軸モータの異常検知に

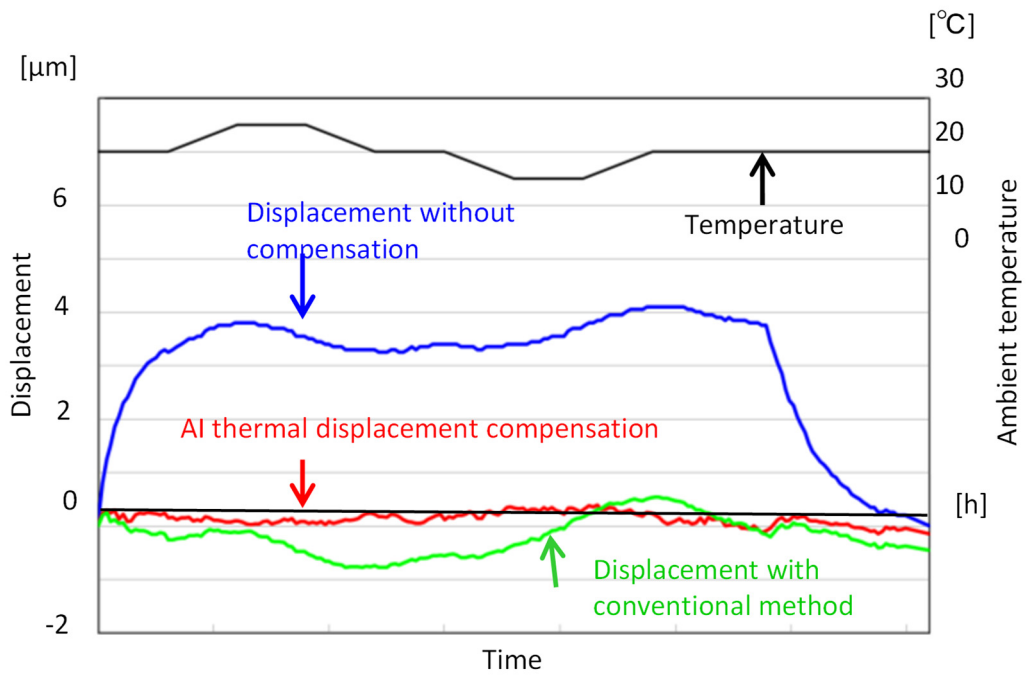
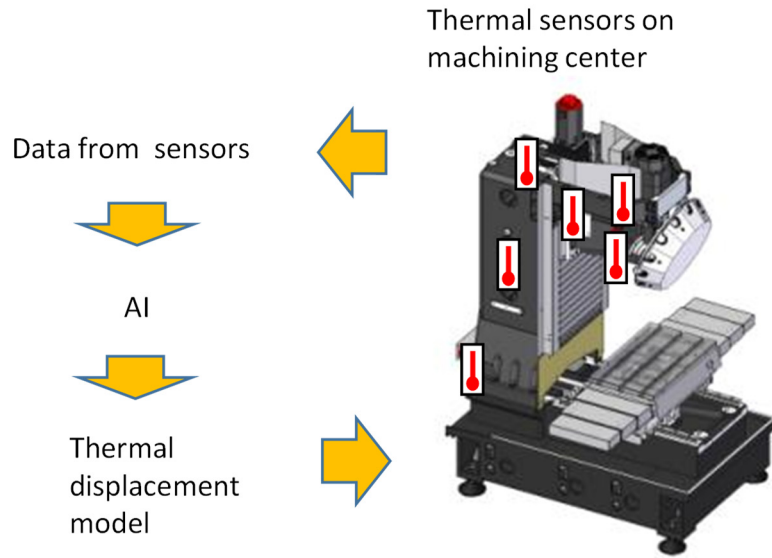


Fig. 2-13 AI thermal displacement compensation

は、ディープラーニングを利用した AI レベル 4 相当の機能が発表されている。製造現場に IoT が普及することにより、機械にまつわる情報が収集しやすくなり、CNC はビッグデータを扱うことが可能になった。AI 機能の性能は学習に inputs するデータの質に依存する。製造現場で役立つ AI 機能には、良質なデータの収集と選別が重要である。

## 2-6 CNC 今後の課題

近年、製造業の事業社数や従業員数は減少傾向にあり、将来の製造業における人手不足の深刻化が懸念されている。また、製造業の抱える品質トラブルの回避や、度重なる自然災害や感染症などの脅威に対して、BCP (Business Continuity Plan) 対応は喫緊の課題である。今後製造業は、専用機やロボットの導入による自動化と省人化や、IoT, AI の活用による作業合理化が進展し、製造、および、製品検査機能は属人化を排除してデジタル技術を活用するようになる<sup>[47]</sup>。IoT 技術をもとに、ネットワーク接続した工場内の設備やセンサを管理して生産性向上を果たすスマートファクトリーの推進により、人手不足、品質の安定化、社会情勢に影響を受けない安定生産が実現されていく。ミスや不正のリスクを排除するには、検査結果の高精度化とリアルタイムで管理できるようになっていくと考える。

スマートファクトリーの重要要素には、工場の製造設備のシステム化による自動化、AI などを活用した知能化、IoT を駆使した安定生産や品質向上があげられる。CNC はすべてに深く関与する技術である。今後、上述のような問題点を克服しつつ、より高度な制御を行うためには、CNC は個の機能限界を定めず、他の機械や複数の CNC との接続性を高め、演算処理を分担して複雑で大規模な制御を実行できることが望まれる。分散処理が実現すれば、高度な演算処理に加え、情報の共有と利活用による知能化、1 台が故障しても他の CNC が処理を補うことができる、「止まらない」工場を実現できる。接続性と知能化には、加工の設計から検査までのあらゆるプロセスでより多くの情報を利活用可能であること、言い換えればあらゆるプロセスが所有する情報の相互運用性の実現が不可欠である。IoT の普及により、工場現有の情報のみならず、ネットワーク経由による大規模な情報共有が現実のものとなってきた。情報の共有に加え、接続することで他の機械や CNC がもつ情報や機能を獲得し、協調または分担して課題に取り組む分散型 CNC の実現が期待される。

## 2-7 結言

本章では、工作機械を数値制御する NC の誕生によって工作機械はより複雑な機構を制御することが可能になり大きく成長を遂げたこと、および、NC はコンピュータを搭載することで CNC となり技術的發展を遂げたことについて詳細に述べた。NC 工作機械によって、金属加工は手仕事からプログラムによる自動加工へと転換され、生産効率は飛躍的に向上した。さらに、複数の異なる加工種類の機械を連続的に使用する生産工程から、1 台の CNC

で複数の加工種類を制御できる複合化された機械による工程集約へと進化した。CNC の高速高精度を実現する基本機能の高性能化と背景にある市場の要求と期待について述べるとともに、製造業のデジタル化に伴い、CNC は工作機械の制御に加え製造 IoT の情報処理の役割も担うことから、今後期待される機能について考察した。将来の製造業における人手不足の懸念、品質トラブルの回避や BCP 対応という喫緊の課題に対して、問題点を克服し高度な制御技術を発展させるためには、CNC は他の機械や複数の CNC との接続性と、情報の共有と利活用による知能化が求められている。柔軟で大容量の接続性を獲得することで、他の機械や CNC がもつ情報や機能を獲得し、協調または分担して課題に取り組む分散型 CNC の実現が期待できる。CNC は今後も製造業において、機能を向上させながら、また役割を広げながら重要な役割を担うことを示した。

## 第3章 統合 CNC システム

### 3-1 緒言

第1章で導出した CNC の高速高精度機能向上の技術的課題は、第2章で述べた CNC の技術背景と今後の発展の方向性から、加工プロセスチェーンの他のプロセスと CNC の情報の相互運用性を高め、他プロセスが生成する情報を有効に活用することで解決できる。本研究では、上記の特長をもつ統合 CNC システムを開発する。

設計情報および加工に関する加工プロセスチェーンの全プロセスの情報を共有する仕組みとして、情報共有の基盤となるデータモデルとそれに基づく共有データベースを提案する。図3-1に示すように、共有データベースは、すべてのプロセスに共通のインターフェースで情報を共有できる。情報の再利用の仕組みの欠如や、一方向の不可逆的な情報フローによる情報の相互運用性の低さを改良することで、各プロセス間での情報の欠損を最小化する。CAD の設計工程において、製造ラインの NC 工作機械の加工能力や加工工程の効率性を考慮した設計を実現できれば、生産工程の最適化のために有用である。また、ある加工機の加工において何らかの問題が発生した場合に、関連情報を設計側にフィードバックする仕組みを実現することにより、より精度の高い製品設計が可能になる。CNC による製造工程においては、現状の CNC では利用することができない設計段階から加工実行までの他プロセスがもつ、または生成する情報を共有することで、CNC が実行する加工プログラムの不

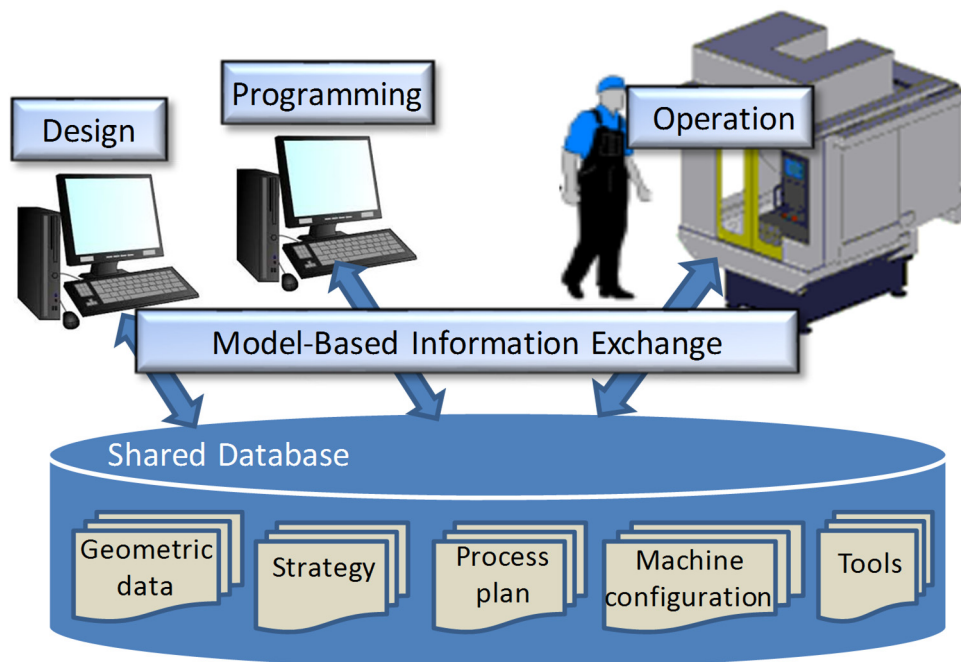


Fig. 3-1 Shared database

确实要素を低減することが可能になる。

CAD, CAM, CNC, 工作機械および加工結果における情報を共有し、加工指令を作成するための要件である、加工条件、加工戦略、工具経路を作成する各プロセスにおいて設計形状情報から抽出した形状データを参照できるようなシステムを作成する。加工指令の生成に形状データを利活用することで、形状データを忠実に工具経路に転写できる。また、加工中の現象や加工現場の機械オペレータによる修正や改良行動を共有データベースに蓄積し再利用することで、加工不良を低減し、加工品質を向上させる。加工現場での作業経験・ノウハウ・加工情報を共有データベースに蓄積し、加工指令の生成において活用できるシステムを作成する。共有データベースを利用することで、他プロセスの情報を利用して高速高精度を実現する CNC と、加工条件を改良するサイクルをもつ CNC を同時に実現することができる。

本章では、統合 CNC システムの基本構造である共有データベースと、共通インタフェースとなるデータモデルについて詳細に述べる。

### 3-2 統合 CNC システムのプラットフォーム

機械加工に関わるすべてのプロセスではそれぞれ入力情報から最大限の出力を作成するため、処理の過程で様々な有意な情報を作り出している。設計プロセスにおける情報の活用に関する試みとして、荒井らは、要求機能に対する設計者の知識を反映した設計意図をモデル化し、CAD システムに記述できる仕組みを構築した<sup>[48]</sup>。また、梅田らは、機能を挙動と状態の関係で表現するモデルを提案し、機能設計を支援する CAD システムを試作し評価した<sup>[49]</sup>。機械加工においても、あるプロセスで生成した情報を他のプロセスで有意に利用する試みがなされてきた。加工現場のノウハウを上流のプロセスで利用する研究として、Yamazaki らは、作業手順や加工プログラム、加工条件をデータベース化し、加工データの生成において利用するシステムを提案した<sup>[50]</sup>。同システムは、加工実績を自動的に解析し、加工ノウハウをデジタルデータ化して参照・利用することを可能としている。長野らは、加工事例をデータベースとして蓄積し、それを基に切削条件を推論する手法を提案した<sup>[51]</sup>。仁戸田ら、Fukuda らは、NC プログラムを分析し、加工フィーチャと加工条件を関連付け、データベースを自動構築し、NC プログラム生成において利用するシステムを開発した<sup>[52]</sup>。<sup>[53]</sup> 椎木らは、実績のある過去の加工操作データを利用して NC プログラムを生成する加工作業計画システムを提案した<sup>[54]</sup>。上述のように、プロセス間の情報の伝達や、加工ノウハウのデータ化と利用についてはいくつかの試みがあるが、実用に適する十分なデータを集めること、また、継続的なデジタルデータ化が困難であったことから、実用システムへの導入は実現されていない。

統合 CNC システムは、加工指令に CAD の設計情報の形状情報を反映することで、精度の高い加工指令の生成を可能にする。さらに、加工現場での作業経験・ノウハウ・加工情報

を共有データベースに蓄積し、加工指令の生成において活用でき、経験の浅い技術者でも高度な加工指令の生成を可能とする。図 3-2 に示すように、統合 CNC システムは、共有データベース、アプリケーションソフトウェア群、モータ制御部で構成される。共有データベースは、(1) 加工形状、公差、面粗さなどの設計情報、(2) 工具や工作機械情報などの加工リソース情報、(3) 加工フィーチャや加工ストラテジーに関する加工指令情報・加工技術情報、(4) 加工品の結果情報などを格納している。アプリケーションソフトウェア群は、加工指令を補正するポストプロセッサ機能、および、加工指令情報・加工技術情報を編集し、加工実績を見える化する機能をもつ。モータ制御部は、既存の CNC (FANUC Series 31i-B) を利用している。図 3-2 は、統合 CNC システムが処理する共有データベースにアクセスするアプリケーションソフトウェア群やモータ制御部の関係性を示している。共有データベースは、実用において有効に活用するために、格納されるデータは構造化されている。構造化することにより加工情報の追加・再利用が容易になり、データを常にアップデートすることが可能になる。本研究において、データを常にアップデートする仕組みを実現し、最新の加工情報を加工指令生成プロセスで活用できる循環型データ継承システムを開発している。

統合 CNC システムは独立したソフトウェアであるため、用途に応じた実装形態を実現できる。図 3-3 に示すように、CNC に直接実装してある特定の工作機械の高精度・高機能化を実現する。もう一つは、図 3-4 に示すように、加工ラインに複数台の工作機械がネットワークで接続されている場合には、統合 CNC システム部は複数の工作機械の共有のデータベ

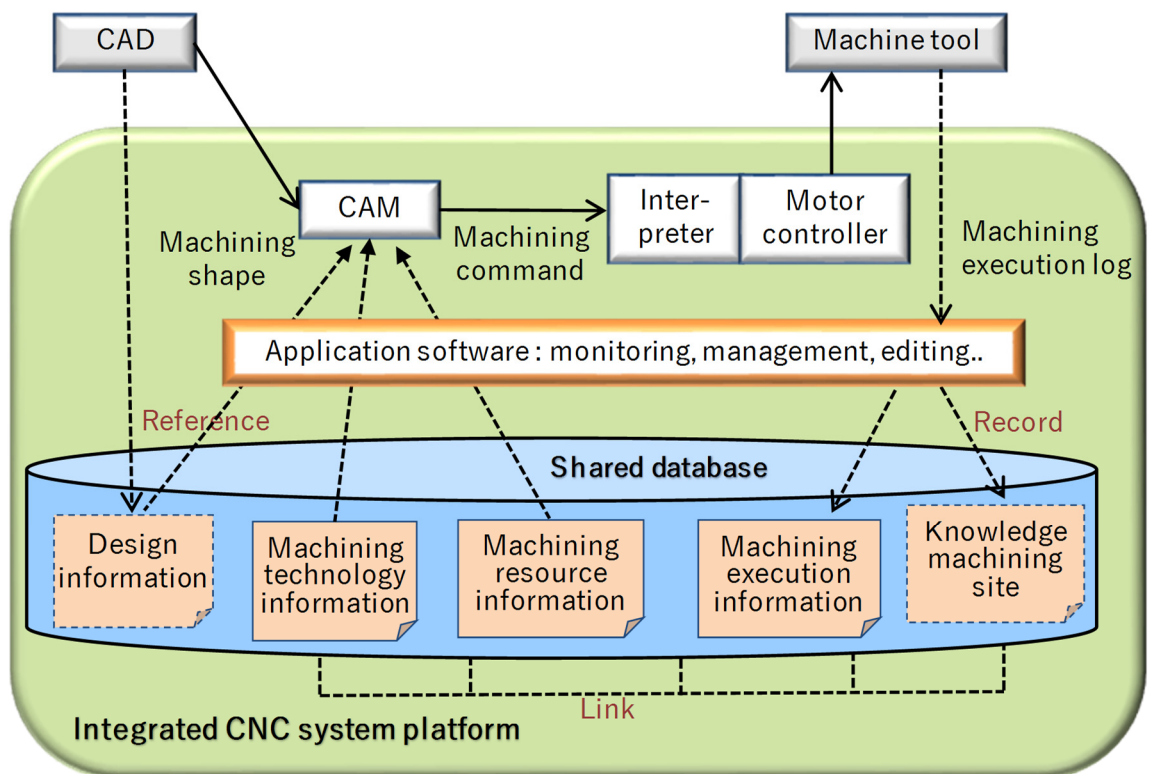


Fig. 3-2 Shared database with software components



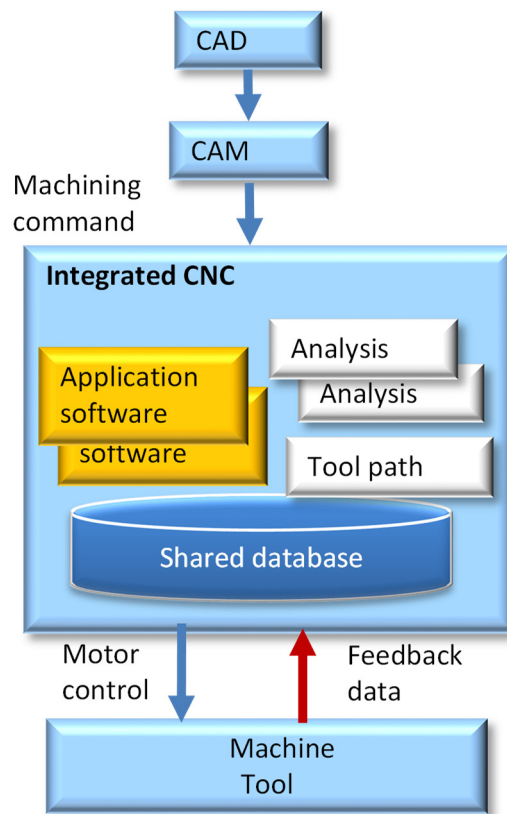


Fig. 3-3 Expected software diagrams of integrated CNC system: stand-alone type

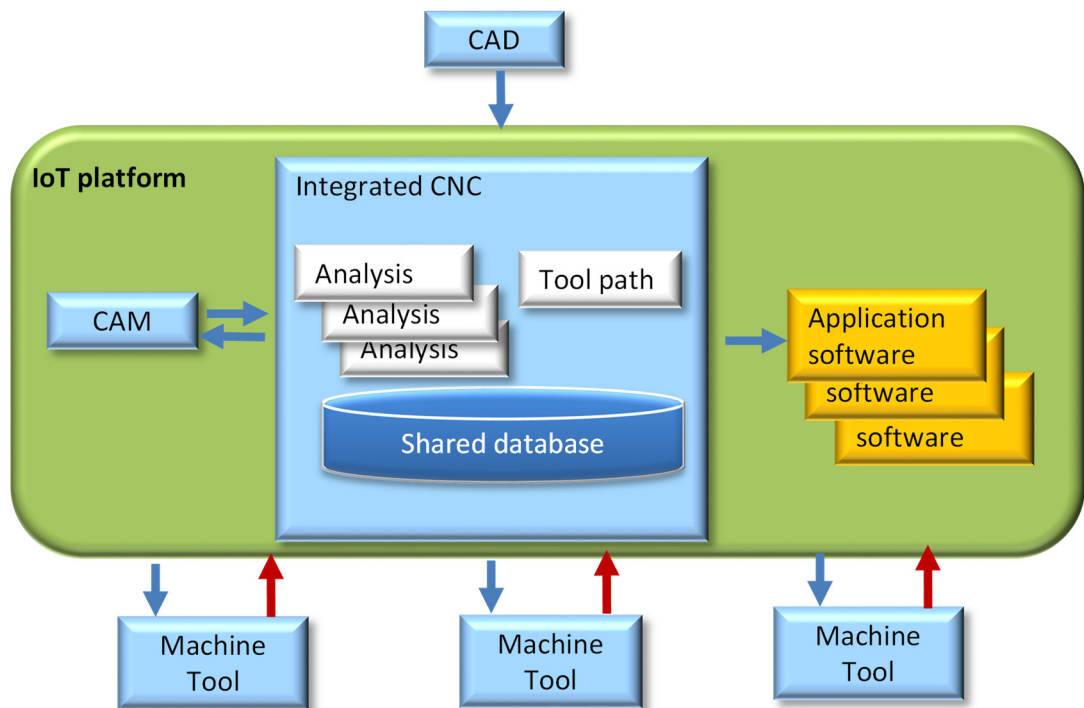


Fig. 3-4 Expected software diagrams of integrated CNC system: common platform

ース及び、加工指令作成エンジンとして機能する。工場の IoT プラットフォームに実装して加工指令を直接 CNC に転送することも可能である。データベースの共通インタフェースとしてのデータモデルがあるため、ネットワーク経由で他のプラットフォームに対してデータを入出力することや、データを共有することで大規模データベースの構築も可能になる。

ここで提案する統合 CNC システムは、従来、工作機械の制御データとして広く活用されている ISO6983 で定義される G コードを基本とした NC プログラムを使用せず、独自の加工指令を用いている。加工指令の詳細、共有データベースの構築法や活用法は、以下に述べる。

### 3-3 構造化データモデル

共有データベースの構築において、すべての加工プロセスにおいて、情報の相互運用性を確実にするために、情報の関係性を説明する構造を共通化したデータモデルを提供する。本研究の情報の相互運用性とは、プロセスチェーンの上流からの情報、および下流からの情報の中から有意性のあるものを蓄積して相互に利用できる仕組みのことである。加工プロセスチェーン内の製品設計から最終製品生産までのプロセスで使用される加工技術、加工戦略、工具情報、機械情報などの、工作物を表現するために必要な情報について説明し、プロセス間で交換できる構造化されたデータモデルを定義する。

ISO 14649 で定義されている STEP-NC (Standard for the exchange of products model) は、機械制御プロセスの情報を記述できる<sup>[55]</sup>。本研究では、共有データベースを構築するにあたり、STEP-NC データモデルを拡張し、図 3-2 に示すように、設計情報、加工リソース情報、加工指令・加工技術情報、加工品結果情報を共有し、加工指令作成プロセスおよび加工実行プロセスで利用を可能とするデータモデルを構築した。表 3-1 にデータモデルを構成する情報を示す<sup>[56]</sup>。本研究において拡張構築したデータモデルは、加工技術情報、加工実行情報、加工結果情報、加工現場の知見であり、表 3-1 においてイタリック体で示している。また、設計情報データモデルには、拡張情報として独自に寸法公差と幾何公差の公差情報、および、表面粗さの表面性状情報を追加した。加工指令作成時に要求仕様として参照されるほか、加工結果の検査工程で良否判定に使用される。これらの追加情報を表 3-1 に同じくイタリック体で示す。

Table 3-1 Data models including extended data models

Data model	Contained information (data item)
Design information	CAD data ( <i>dimensional tolerance, geometric tolerance, surface roughness, characteristic data</i> ) , Defined machining features (machined shape) and information( <i>special characteristic</i> )
Machining resource information	Collected data of machine tool( <i>machine tool state</i> ), cutting tool( <i>actual tool state</i> ), pre-setter, measuring machine etc.
Machining command information	Defined machining process (machining type), strategy information
<i>Machining technology information</i>	<i>Information on manufacturing features, tools, choice of machining process etc.</i>
<i>Machining execution information</i>	<i>Execution log(execution record, machining environment, cutting state)</i>
<i>Machining result information</i>	<i>Information obtained as machining results such as inspection data</i>
<i>Knowledge of machining site</i>	<i>Machining process maintaining quality, machining optimization etc, machining operator's know-how</i>

すべてのデータは、ISO/IEC 11578<sup>[57]</sup>で規定された UUID(Universally unique identifier) という 16 桁の文字列で識別される。本研究では、UUID はタイムスタンプと組み合わせた MAC アドレスで構成され、データ生成時にランダムかつ自動的に生成され付与される。データベースの追加、削除、修正などの編集処理は、当該処理関数に UUID を指定することで実行されるよう開発した。加工実行情報と加工結果情報、および加工技術情報の紐付けは UUID を指定することで相互参照が可能である。

統合 CNC システムのデータベースは、図 3-4 に示すような複数台の工作機械の共有データベースとしての拡張性を考慮し、複数のデバイスから収集されるビッグデータを複数のサーバで分散処理するのに適した MongoDB を採用し、データモデルはデータの追加が容易にできる JSON 形式で記述する。本研究で開発する共有データベースは、設計から加工まで情報共有するプラットフォームとして、オブジェクト指向データベースでデータモデルの追加が容易であり、オブジェクトに高速にアクセスできることから製造設備のデータベースに適している。

## 3-4 共有データベース運用方法

### 3-4-1 専用の加工指令

各プロセスでデータシェアリングできることで、加工に必要な情報を確実に次のプロセスに継承することが可能となる。加工技術者の意図を記述できるよう、加工の視点で情報を階層化して構造化することにより、設計から加工、計測まで、一つの加工に関する情報が関連づけられ、データ相互の参照、継承などが柔軟に行える。例えば、工具経路を構造化することにより、加工指令点列のグループ化や、グループごとに属性を付与することが可能になる。また、構造化することでデータの追加が容易になることを利用すれば、加工精度を補償するために有用な形状の特徴情報を加工指令に付加することも可能になる。

CAD で作成した情報を、可能な限り後続の加工プロセスで継承することを実現する目的で、STEP-NC データモデルを拡張・追加した。例えば、STEP-NC データモデルは、設計形状の定義は可能であるが、特徴点を指定するなどの加工精度を補償する加工指令を作ることは考慮されていない。そこで、加工精度を向上させる効果のある特徴点に代表されるような付加情報をデータモデルに追加した。

#### 3-4-1-1 特徴点情報データモデル

特徴点情報に着目すると、プロセス間のデータフローは下記のようなになる。

- ① CAM オペレータは設計図面を基に CAD の幾何情報から統合 CNC システムの付加情報である特徴点を抽出する
- ② CAM は加工技術情報を参照し加工指令を作成する
- ③ 加工指令が CNC によって解読・実行される、特徴情報から機械特性に依存しない高精度な輪郭加工ができる
- ④ 加工実行情報が加工指令と関連づけて記録され、次の加工の改良につながる

工程の自動設計や、加工プログラムの自動生成については多くの研究がなされている。Dwijayanti ら、そして Kiyooka らは CAD で作成される形状データから features を抽出し、自動的に工程設計を行い、NC プログラムを生成するというシステムを開発した<sup>[58]、[59]、[60]</sup>。が、本研究のように、特徴点情報に着目したものはこれまではなかった。本統合 CNC システムは上記 ② で説明するように、共有データベースにある機械固有の NC データを使用して工具パスの生成や加工条件の選定を行うことができるため、加工工程で NC データが変更された場合でも常に最新の情報を使用できる。加工工程内の動的な変化に対応することで、常に、より精度の高い加工指令を作成する。

Table 3-2 Extended data model of characteristic points

ClassName	Property
SpecialCharacteristic	
SharpPoint	specialPoint : CartesianPoint
SharpCurve	specialCurve : BoundedCurve
SpecialSegment	spStart : CartesianPoint spEnd : CartesianPoint

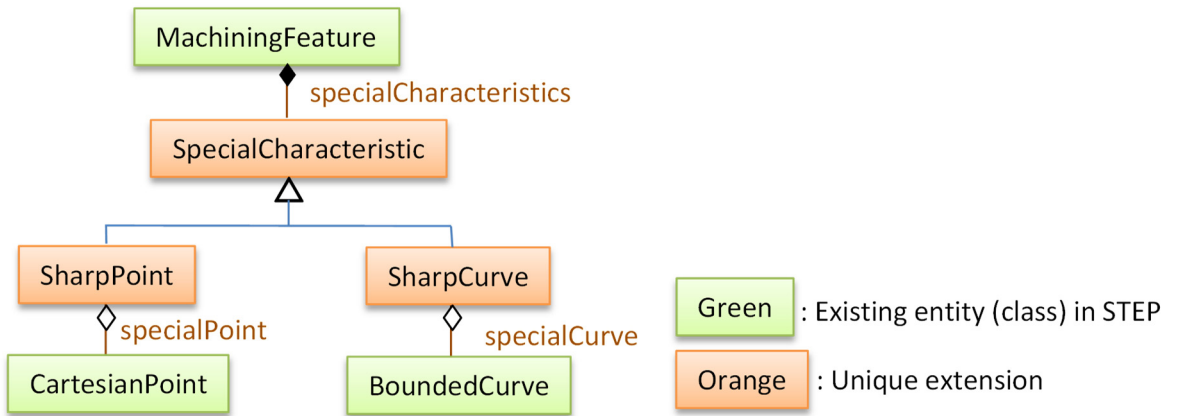


Fig.3-5 Class diagram of the special characteristics

加工形状のデータモデルにおいては、3.2 節で説明したようにステップ形式の Machined shape に拡張データとして information (special characteristic) を追加した。special characteristic に関するデータモデルを表 3-2 に示す。本システムでは、特徴点情報は、G コードで表現することができないエッジ形状を表す Sharp point と、2 曲面の接線である稜線を表す Sharp curve を開発した。特徴点情報は、加工実行時に Machining command information にある加工ストラテジーによる形状分析に使用され、専用の特徴点減速アルゴリズムにより、加工指令の補正や速度制御が行われる。図 3-5 に示すようにデータモデルが階層構造化されていることから、特徴点情報を新たに追加することが可能な構造となっている。設計意図を実現する特徴点を追加していくことで、より正確に設計形状を再現することが可能になる。

### 3-4-1-2 加工指令データモデル

統合 CNC システム専用の加工指令は、CAD から継承される製品情報（製品形状データ、公差、被削材材質、被削材形状データ）と、専用の CAM で生成される加工の単位である Workingstep の組み合わせで構成される。Workingstep は、表 3-1 においてイタリック体で表示されている独自の情報が追加された STEP-NC 形式で記述されており、加工フィーチャと加工情報（工具経路パターン、工具、切削条件等）で構成されている。STEP-NC の規格は、加工フィーチャ自由曲面に関する規格はまだ十分に検討されていないため、工具経路パターンに替わり CAM が出力する CL データを利用することを可能としている。本研究では、設計形状が自由曲面を含む場合は CL データを利用して、共有データベースに搭載される CAD の設計形状を利用して指令点を補正することで、加工形状の指令精度を向上する。現在の NC プログラムは許容範囲内の誤差を含む点列データであるが、本システムでは、設計形状を反映する有意な点群を作成することで形状精度が補償され、誤差を排除した工具軌跡の加工指令を生成する。加工実行時には、これらの情報を元に統合 CNC システム内のインタープリタにおいて工具経路が作成されるとともに、モータ制御が可能な実行形態に

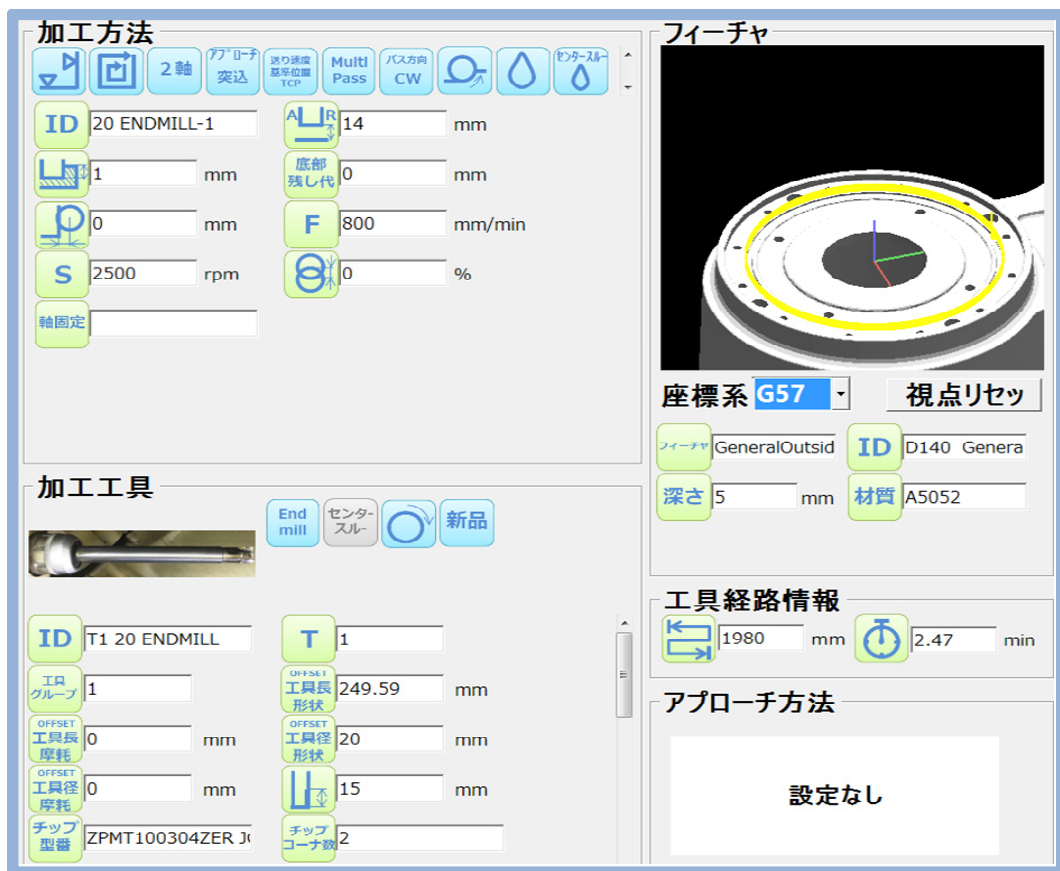


Fig. 3-6 Machining command edit screen

変換される。

これらの情報は、図 3-6 に示す編集画面により Workingstep ごとに提示され、オペレータが確認・修正できる。図 3-6 では、加工フィーチャ General\_outside\_profile をエンドミル工具で側面加工をする例を示しており、対象となる加工部分が CAD 情報を元に画面右上部に表示されているので、工具経路パターン、加工方法、工具詳細などのデータの確認をとりながら編集することができる。

従来の G コードを基本とした NC プログラムによる加工指令は、CNC が工作機械を制御するためだけに使用されている。一方、本研究で構築した加工指令は、加工フィーチャを基本として切削工具、工作物材質のデータを関連づけて生成するため、加工ノウハウを容易に共有できるとともに再活用できる特徴がある。

### 3-4-2 加工改良の共有

加工技術者の経験に基づくノウハウや意図を記述し活用することを容易にするため、共有データベースに格納される情報を階層構造のデータモデルとして構築することで、実行された加工に関わる情報である加工技術情報と加工指令を対応づけて共有データベースに格納できる。

設計業務に関する知識共有の研究は、知識を所有する技術者が在籍するあいだに行う必要があり、阿部らは、自然言語を使用して知識の獲得や継承を試みている<sup>[61]</sup>。中山らは、知識を設計業務にフィードバックする仕組みには、設計の背景知識抽出の重要性を指摘した<sup>[62]</sup>。機械加工に関しては、知識の構造化と共有という研究がなされてきた。加工実行情報を共有データベースに取得し、共有する試みとして、Mitsuishi らは、リアルタイムの加工状態監視や適応制御、学習機能のための効率的な切削条件決定のために、迅速なデータベース取得方法と、異なる工作機械間でのデータベース共有方法を開発し、有効性を実験的に確認した<sup>[63]</sup>。Kimura らは、製造技術の専門的な知識の役割と使用法を調査し、実践的な知識獲得方法を研究した。金型の設計と製造について評価し、金型製造のリードタイム短縮を示した<sup>[64]</sup>。成子は、知識やノウハウを形式化するためのモデル化を提案し、階層構造とすることで知識の連鎖を表現した。知識というコンテンツの入力に課題が残るが、設計・製造両方にリードタイム短縮の効果を確認した<sup>[65]</sup>。

加工指令作成時の加工条件と実際に加工に使用された加工条件の相違は自動的に検出され、ユニークな UUID が付加された新たな加工技術情報として自動的に共有データベースに追加される。このとき、機械オペレータにより、加工条件の変更の理由が専用 GUI の編集機能を使用して記述される。この加工技術情報は新規加工指令の作成プロセスや、加工実行時に機械オペレータにも参考情報として共有され、加工の改良に活用される。変更の理由は、加工条件改良のための評価の画面に表示され修正データ選択の参考にされる。このように、統合 CNC システムでは、実際の加工工程内で作り出された有意な情報が放棄されるこ

Table 3-3 Extended data model of machining technology information

ClassName	Property
FeatureBasedMachiningTechnology	(General representation of manufacturing knowledge link with manufacturing features) itsFeature : ManufacturingFeature itsShapeTolerance : globalTolerance itsQuality : MachiningTechQuality
ManufacturingFeature	itsOperations: MachiningOperation itsId : Identifier ExplicitRepresentation : Face itsWorkpiece : Workpiece Target : MachiningTarget specialCharacteristics:SpecialCharacteristics itsMaterial : Material
MachiningTarget	quality : MachiningQuality Target : Identifier CAMtolerance : ShapeTolerance surfaceRoughness : SurfaceTextureParameter geometricTolerance: GeometricTolerance dimensionalTolerance : PlusMinusValue
MachiningQuality	accuracyLevel : Level smoothingLevel : Level MachiningTechQuality

となく加工指令までさかのぼって再活用を可能としている。実行された加工情報が改良理由とともに蓄積されていくことにより、常により良い加工条件が再活用されるシステムとなっている。

### 3-4-2-1 加工技術情報データモデル

加工技術情報は、STEP-NC を拡張し、加工実行時に使用される切削条件および加工プロセスの情報を追加したデータモデルである。同情報は、Workingstep ごとに加工フィーチャとその形状を加工する方法（使用工具、加工プロセス、切削条件）が表 3-3 に示すように階層構造でデータモデル化されている。



加工実行時には、Workingstep ごとに機械から取得される主軸負荷（モータ電流値）、機械各部からの温度・振動センサ情報が CNC を経由して加工実行情報として取得される。加工実行情報は機械オペレータにより分析され、改良・修正された加工方法は加工技術情報として共有データベースに蓄積される。改良・修正の際には、その根拠も同時に共有データベースに記録される。加工技術情報は、加工指令の生成とその改良・最適化のために活用される。改良プロセス詳細は 3-4-2-2 で説明する。より多くの情報を蓄積することで、加工の改良や最適化のための加工条件の選択肢も増加する。修正理由に工具折損や加工不良などが確認される場合には、その条件を避けることによりトラブル回避も可能になる。

### 3-4-2-2 加工実績による加工指令の改良

加工指令を改良するために、加工指令と実際の加工時の加工実行情報・加工品結果情報を関連づけて加工技術情報として記録することにより、加工指令作成時に活用できる。このシステムを運用して加工を重ねていくことで、加工技術情報・加工実行情報が蓄積され、生産性を向上し、加工品質を改良する加工指令を生成できる。図 3-7 は、加工指令改良のプロセ

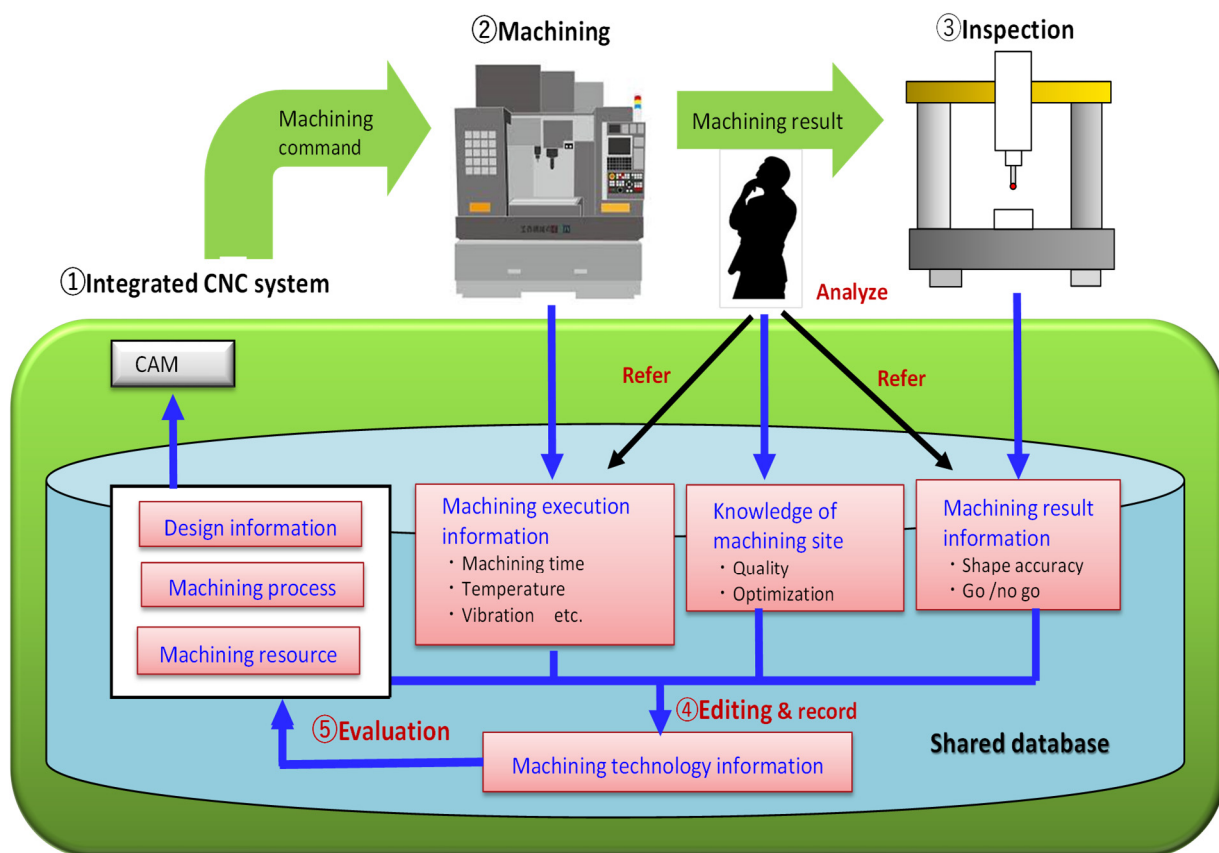


Fig. 3-7 Machining technology information generation mechanism

スを示している。同プロセスは、下記①～⑤で実行される。

- ① 加工指令の作成：専用に開発した CAM システムにより、3.1 節(1)で述べた統合 CNC システムの加工指令を生成する。加工指令作成時には統合 CNC システム共有データベースにアクセスして加工技術情報を参照する。
- ② 加工の実行と加工情報の記録・更新：上記①で生成された加工指令により、工作機械が駆動される。加工実行時間、加工中の主軸負荷（モータ電流値）、機械各部の温度・振動センサ情報、加工実行時のオペレータによる加工指令の修正データ（オーバーライドによる切削速度・送り速度の変更）は、Workingstep ごとに加工実行情報として共有データベースに自動的に記録される。
- ③ 加工品の検査：3次元測定機やネジゲージを使用し寸法精度を、また表面粗さ計を使用して面粗さが測定される。機械オペレータにより、Workingstep ごとに共有データベースに加工結果情報として記録・更新される。
- ④ 加工技術情報の編集・記録：機械オペレータは加工実行情報の分析を行い、必要に応じて共有データベースの加工技術情報を修正し、その理由を記述する。例えば、モータ電流値で過負荷を検出すると送り速度を下げる、あるいはモータ電流値が上限より低い場合には送り速度を上げるなど加工技術情報を編集して記録する。また、加工結果から表面にびびりが認識された場合には、切り込み量を小さくするように加工条件を修正する。修正された技術情報は、新たな UUID をもつ加工技術情報として共有データベースに蓄積され、修正前のデータは変更せずそのままデータベースに残存する。
- ⑤ 評価：蓄積された加工技術情報は、加工指令作成時あるいは加工実行前に、図 3-8 に示されるように評価指標に基づき順位付けされ提示される。図 3-8 では、画面左部に現在使用されている加工技術情報が表示されている。右半分には、共有データベースを検索して評価スコアの高い順番に表示されており、現在の情報との差異がハイライト（黄色）で示されている。スコアの順にタブで選択し加工条件を比較・検討することにより、より高い評価スコアが得られる加工条件に修正できる。評価指標については、以下の 3-4-2-3 節で述べる。

上述のように、提案する統合 CNC システムでは、実加工実績に基づき加工指令の情報がデジタル化され蓄積される。このため、加工実績を加工指令の生成において活用できるため、加工指令を改良していく仕組みとなっている。

本システムでは、図 3-6 に示す加工指令編集画面で切削条件を変更することにより、または、図 3-8 の評価画面でデータを編集することにより加工指令にその修正が自動的に反映される。3-4-1-2 節で述べたように、統合 CNC システムは STEP-NC 規格を使用していることから、加工指令は加工フィーチャごとに複数の工具経路パターンを内蔵している。工具経路パターンは加工ストラテジーによって選択され、加工指令のデータは工具経路を生成する際に、ジオメトリを決めるためのパラメータとして使用される。従来の NC 工作機械で必要とされる NC プログラムを解析して確認・追加・変更などの作業は不要である。統合

CNC システムは共有データベースに形状情報をもつため、CAD に戻ることなく加工指令編集画面に表示される工具軌跡表示を確認しながら修正ができる。

### 3-4-2-3 評価の指標

機械加工における加工結果の良否判定基準として、切削加工の品質と生産性を両立する加工条件を評価するために、自動車製造ラインにおいて、中山らは、実物の切屑形状と加工時間を組み合わせて評価している<sup>[66]</sup>。切削効率という観点では、神蔵らは、電力消費量と除去された材料の重量を測定する評価を行っている<sup>[67]</sup>。工作機械の加工性能を示す指標として、稼働時間内で切粉が出ている純切削時間の割合である切り屑排出量と定義されることがある。

本研究では、下記①～③の指標に基づき、各 Workingstep のデータを評価する。生産数、生産期間と CAD 情報（公差、面粗さ）の要求仕様に基づき、評価する指標が選択される。加工フィーチャと加工リソース（使用する機械、工具）の一致は必須項目として、工具経路パターンや加工条件を選択項目として、共有データベースから必要情報を検索する。検索結果は図 3-8 に示すように、加工技術情報評価画面に高スコア順に加工技術情報が表示され、

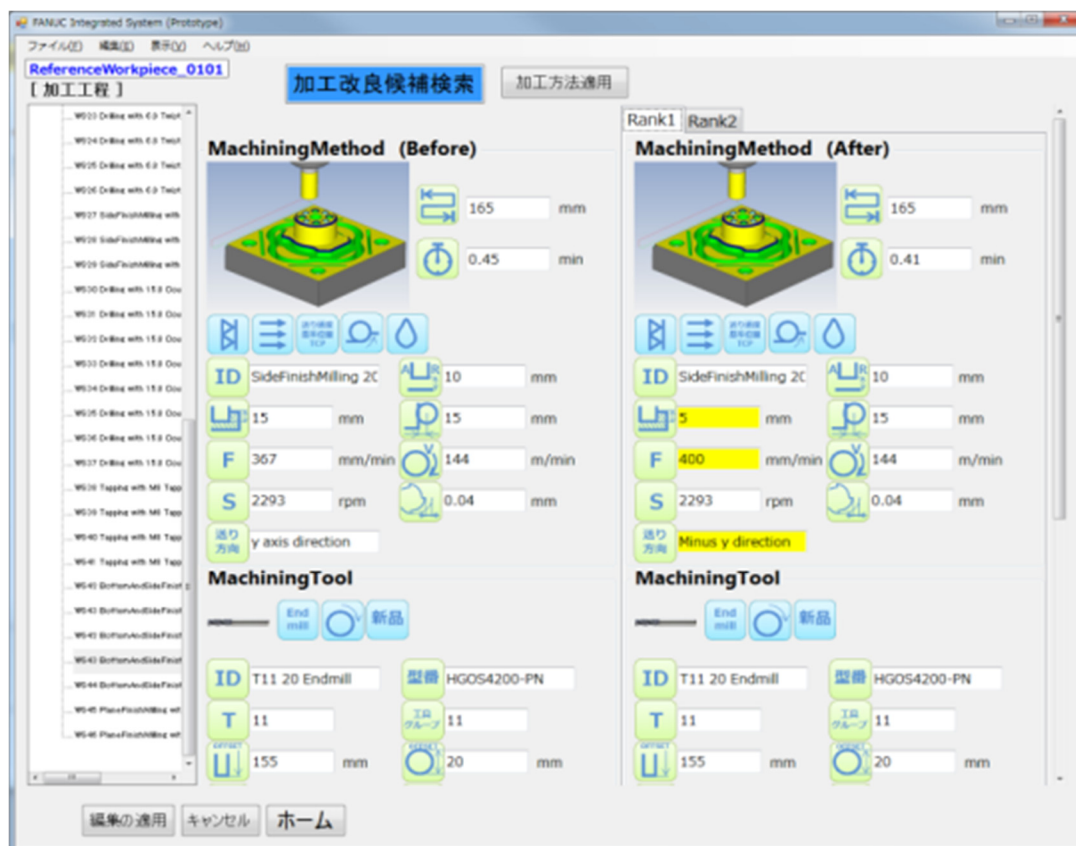


Fig. 3-8 Machining technology information evaluation

オペレータが内容を分析して選択する。

- ① 加工時間指標（単位時間当たりの切り屑除去量）：切削除去形状と加工条件から単位時間あたりの切削除去体積を算出する。加工負荷に応じて切削速度を最適化した結果が除去体積として同定できるため、体積と加工時間は正の相関関係にあるといえる。同一検索条件のもとで除去体積がより大きい加工指令を高スコアとする。
- ② 面品位指標（面粗さ）：CAD 情報で指定された面粗さを基準として、加工面の測定粗さが CAD 情報で指定された粗さよりも小さい場合に良の判定を、大きい場合には否の判定をする。加えて、オペレータは加工痕や切れ刃模様から、加工面の良否を目視で判定する。
- ③ 加工コスト指標（工具寿命）：主軸動力から推定される切削負荷を利用した工具寿命予測により、高寿命の加工条件を高スコアとする計画である。現時点では未実装であるが、将来の課題として取り組む予定である。

本システムでは、優先する指標を選択する単一指標で評価している。実際の加工改良とは要求仕様と加工効率の実現であるため、効率的な加工時間と良質な加工面品質が同時に実現されることであり、単一の指標では評価できない場合がある。また、改良のための情報源をオペレータの知見のみに依存しては、オペレータの技量を超える改良は困難である。今後、評価の指標について考慮すべき条件として以下 3 点をあげる。第 1 に、評価指標の複合化である。加工時間と加工面品質を同時に評価するために、複数の指標を組み合わせる評価指標を複合化して運用する。トレードオフの関係性にある評価のパラメータを、要求内容に合わせた調整や選択を可能にすることで、現実に即した評価ができる。第 2 に、合否判定の否データの活用である。本システムは、加工の指標となる加工技術情報のデータを指定してスコア化または良否を判定するが、否と判定されたデータもその理由と共にデータベースに蓄積している。現在は良判定のデータを使用しているが、否判定のデータを分析することで、加工不良を回避するための加工条件修正の提案が可能になる。第 3 に、入力データの重み付けである。本システムは、熟練者は加工条件を改良できる場合にデータを修正するという条件のもと、改良のために入力したデータはすべて蓄積しており、データの増加とともに高スコアとなるデータに収束していく前提としている。熟練度のレベルに応じた入力情報の重み付けを行うことでより高条件の加工技術情報を効率的に収集することが可能になる。また、実用化の際には、評価の指標から本システムが提案する改良候補データが何かの不具合により不適當なものが選択される可能性を否定せず、加工結果を改良できない負の影響に対応した備えが必要である。改良データを提案すると同時に、選択した結果を評価して効果を確認することが必要である。

### 3-5 結言

本章では、前章で述べた情報の相互運用性向上の課題に対し、CNCの高速高精度機能開発の技術的課題について、加工プロセスチェーンにおける他のプロセスとCNCの情報の相互運用性を高め、他プロセスが生成する情報を有効に利用、さらに、再活用できる仕組みを用いることで、問題解決を考案した。本研究では、CAD、CAM、CNCおよび工作機械の情報を共有し、生産準備や加工の各プロセスを効率化・高度化する統合CNCシステムを開発した。情報共有の基盤となる共有データベースは、STEP-NCのデータモデルを拡張し、構造化されたデータモデルにより、すべてのプロセスに共通のインタフェースで情報を共有する。専用の加工指令に拡張情報を付加する構造や、改良データを作成・評価する仕組みについて述べ、データ高精度で生産性の高い加工指令を生成するための基盤として、情報の再利用の仕組みの欠如や相互運用性の低さを改良することを示した。

## 第4章 統合 CNC システムによる加工精度向上

### 4-1 緒言

本章の目的は、第3章で述べた共有データベースのデータモデルを使用して、高精度加工を実現することである。統合 CNC システムは、共有データベースに、CAD、および CAM における情報を共有し、加工指令を生成するための要件である、加工条件、加工戦略、工具経路を作成する各プロセスにおいて CAD の設計形状データから抽出したデータを参照することで高精度な加工を実現する加工指令を生成する。本章では、高い形状精度を実現する2つのアプローチについて説明する。第1は、CAD の設計形状から特定した特徴情報が CAM を経由しても共有データベースを利用して CNC に継承されることで、特徴形状を正確に加工することである。第2は、自由曲面の工具経路において、工具経路を CAD の設計形状データを直接参照して補正することで、隣接する経路間の誤差を低減することである。統合 CNC システムは、従来の技術に比較して、CNC や機械特性に依存せず、CAD で設計した幾何情報を精度よく表現できることを検証する。

### 4-2 CAD の設計情報の継承による精度向上

金型加工は、高い形状精度を実現することに加え、製品の意匠上表現される特徴情報が正確に金型に転写されていることが型形状の良否を決める。3次元 CAD が一般化したことで曲線・曲面における意匠を CAD システムで表現する研究としては、自動車デザインで要求される高品質曲面を生成する Higashi らによる意匠形状を表現する CAD システムの研究がある<sup>[68]</sup>。Oya や木村らは、意匠的な曲線を表現する曲率変化曲線の研究を実際にシステム構築して 3D モデリングに応用した<sup>[69],[70]</sup>。加工プロセスチェーンにおいては、CAM が生成する工具経路における CAM トレランスに起因する経路誤差を極力小さくすることと、CAD で抽出した特徴情報を CNC が理解して制御できることが精度の高い形状加工を実現する要件である。従来の技術では、形状精度を高めるためには、精度の高い工具経路を生成する NC プログラムに加え、加工中の適切な速度制御が重要である。CNC は、NC プログラムの工具経路を解析して、指令速度から移動指令を単位時間当たりの各軸の移動量に分配する。軸移動にともない各軸に制御系に由来する遅れ量が発生するが、その遅れ量を全軸合成したものが工具経路の誤差量となる。従来技術では、良品とされるトレランスの範囲を超えて誤差が大きくなった場合には、指令速度または指令速度に到達するまでの時間を表す加減速時定数を経験的な知見や試行により最適値に調整することで解決している。速度制御と機械特性という要素の組み合わせで誤差が発生するため、幾何学的に正しい工具経路を生成しても、工具の軌跡誤差は、速度制御の結果によって生じるため、誤差量を幾何学的に指定したり計算で予想することは困難である。また、CAM で生成する NC プログラム

は、基本的に幾何情報から CL データを生成し、機械情報や工具情報を考慮して NC プログラムを生成する。いっぽう、加工に必要な各種パラメータは個々の工作機械で調整や変更されているため、固定値ではないことから、実加工時に使用する機械情報や CNC のパラメータを基に工作機械を最適制御する工具経路を生成することはむずかしい。

本研究で開発した統合 CNC システムは、システムの共有データベースに、実加工工作機械の機械特性や CNC パラメータ情報を動的に含むことができる。共有データベースの機械および CNC の固有のパラメータを使用して工具経路の生成や加工条件を選定することで、機械特性を正確に反映した加工指令を作成できる。また、加工現場で加工条件が変更された場合でも、そのデータをフィードバックできる仕組みにより常に最新の情報を使用できることから、加工工程内の動的な変化に対応可能である。

金型の精度実現のためには機械特性に依存せず誠実に設計形状を幾何学的に工具軌跡として再現できることが望ましい。開発した統合 CNC システムでは、共有データベースの CAD データを活用することで、正確に稜線上に加工点を指令できる。加えて、金型の意匠を表す特徴形状では、加工指令に記述された特徴点情報と、加工技術情報に記述された特徴点での指令速度情報から減速の判断は行われ、形状や指令速度の影響を受けない正確な工具軌跡を制御できる。本研究は、専用の加工指令とその制御アルゴリズムを開発することで、速度による誤差を抑制し、工具経路の誤差量までを幾何学的に加工指令で制御することを目的とする。統合 CNC システムでは従来の技術に比較して、CNC や機械特性に依存せず、CAD で設計した幾何情報を精度よく表現することが可能になる。

#### 4-3 特徴点情報の抽出と活用

CAD で特定した特徴情報が CAM を経由しても共有データベースを利用して形状情報として CNC に継承されて有効に利用できることを実証する。具体例として、図 4-1 に赤線で

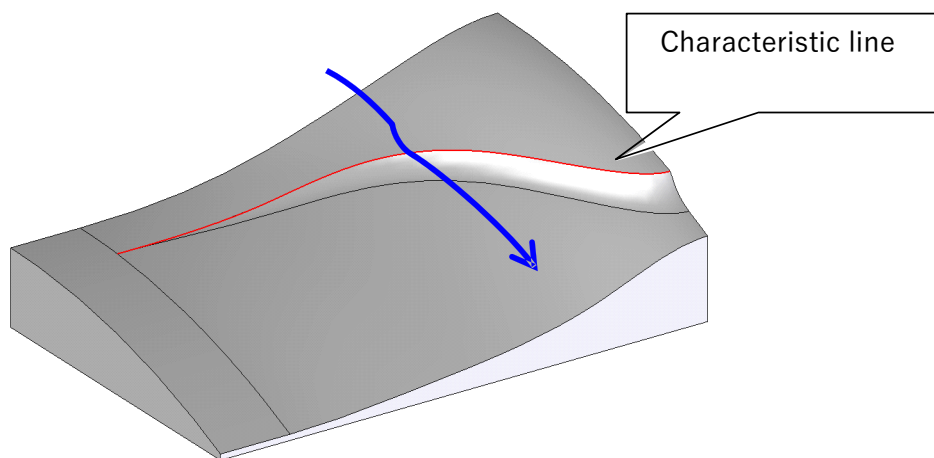


Fig. 4-1 Intersection of two curved surfaces

示すような、2つの曲面の交線上に特徴線としてエッジを出す形状を検討した。金型の高い形状精度実現のために、面と面との交線を正確に形成することは重要な制御である。図 4-2 は、2 曲面の交線としての特徴線を効果的に使用した自動車車体外板のデザイン例である。統合 CNC システムでは、交線が特徴部位であることを加工形状（この場合 2 曲面による複合形状）の属性に記述できるようデータモデルを拡張したことを利用して、このエッジ形状を正確に加工する。

今回のケーススタディでは前述の金型形状を簡略化した例として 2 平面の交線を試作した。加工速度が高速になる程、CNC は機械ショックを避けるための速度制御を行う、かつ、サーボ系の追従性が低下し位置偏差は拡大する。加工速度が低速な場合に軌跡精度が良好であっても、高速になるほど軌跡精度が悪化しエッジ角を出すことは難しくなる。そこで、加工形状は限りなく  $180^\circ$  に近いエッジ角をもつ山形形状とする。図 4-3 に示すエッジ角  $178^\circ$ 、 $176^\circ$ 、 $172^\circ$  の山形形状に対し、それぞれを高速加工において、従来技術による加工と統合 CNC システムを使用した加工を行い、2 平面の交線である稜線を含む加工形状の精度と加工時間を比較する。

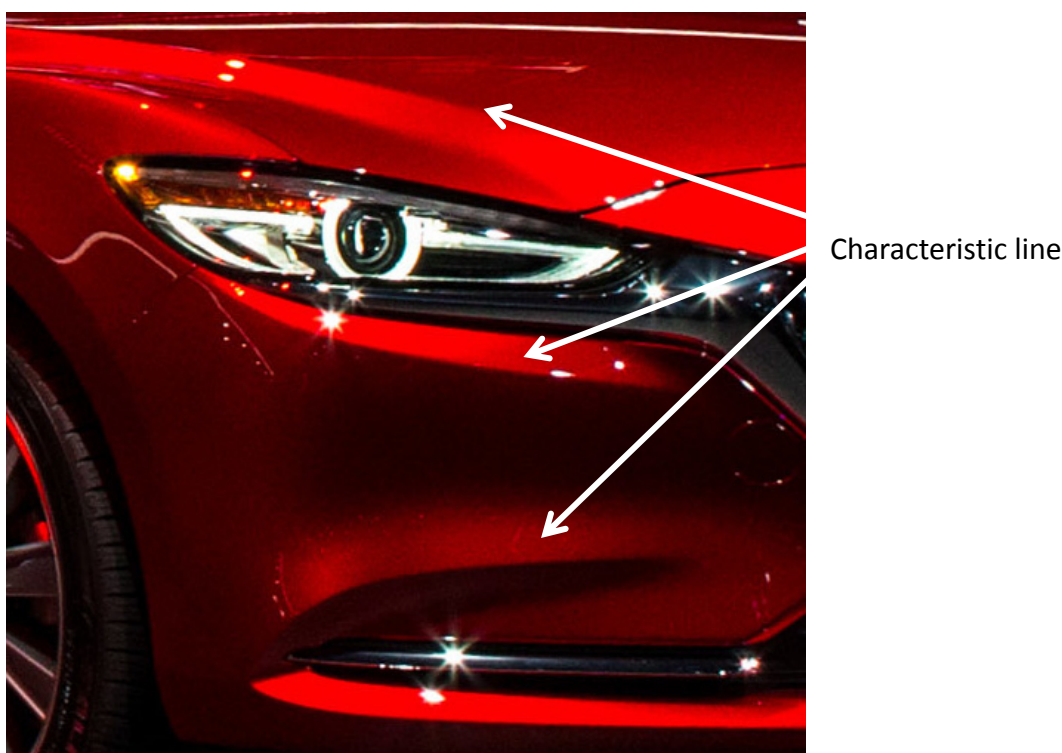


Fig. 4-2 Car body outer plate<sup>[71]</sup>



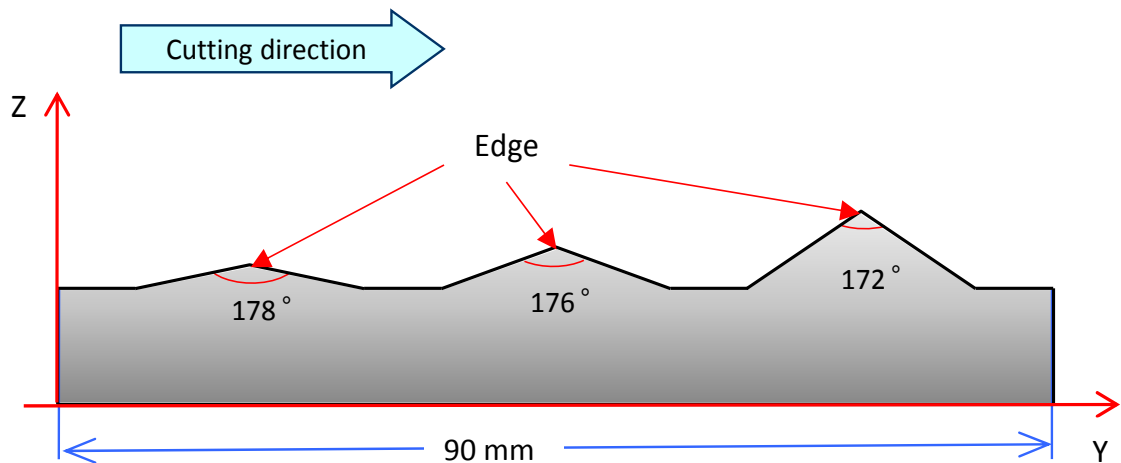


Fig. 4-3 Machined sample shape considered in case study

入力データは、加工リソース情報として、工作機械は小型3軸マシニングセンタ、被削材はアルミ合金(A5052)、工具は直径4.0 mmのボールエンドミルを使用した。Machined shape データの中には、前述の加工形状に加え、拡張データである特徴線情報をもつ。

評価の指標としては、軌跡精度としてレーザ顕微鏡で計測したエッジ頂点の内回り量と、加工時間を選択した。

#### 4-3-1 加工ストラテジー

従来技術では、形状精度は加工プログラムの指令点が指定されたトレランスの中に入っていれば許容される。その場合、稜線上の指令点はトレランスの範囲内であればつき、稜線がクリアに加工できない場合がある。また、稜線を一回の加工パスとして考察する場合は、エッジ形状として精度を補償するためエッジ頂点部で適切な減速がなされる必要がある。従来技術には、エッジ形状を加工する技術としてコーナ減速機能があるが、コーナ部減速の要否はCNCに設定されたコーナ角度の閾値や、コーナ減速パラメータによって一意的に判定されるため、コーナ部の精度はCNCの設定や機械特性に影響を受ける。機械加工においては、形状の軌跡を保つためにコーナ部では減速するという制御は従来より行われてきた。Jeon は CNC 工作機械の移動距離、加速間隔、減速間隔が与えられれば、これらの係数を用いて、速度プロファイルを効率よく生成するという加減速を一般化する方法を提案した。また、コーナ形状部の加減速制御に特化した研究も行われている<sup>[72]</sup>。Shih らは、コーナ形状における加減速に遅延時間を与えるという速度制御のストラテジーを検証した<sup>[73]</sup>。Yamazaki らは、指数加減速と直線加減速を用いたコーナ部運動の比較評価を行った<sup>[74]</sup>。提案する指数加減速でコーナ部での近回り誤差を低減できたが、機械振動も発生したことが

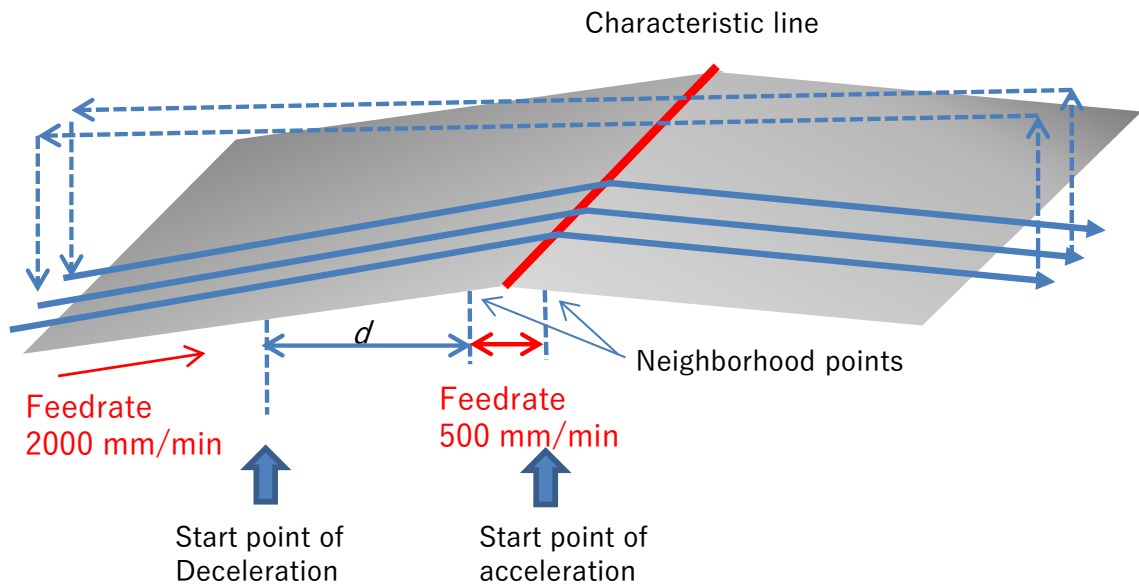


Fig. 4-4 Acceleration deceleration strategy

報告されている。NC 工作機械には高速な輪郭運動が求められるが、急激な加減速による機械振動が発生して精度が悪化するという命題が常にともなう。一般的には、全体的に速度を下げても機械ショックが発生しない安全な速度変動の範囲内で加工を行い、機械能力限界値の加減速が行われることはない。

今回の加工対象のように、限りなくエッジ角が  $180^\circ$  に近い条件ではコーナ角度の閾値外となりエッジ形状と認識されることは無く、減速の配慮はされない。また加工プログラムのブロック間においては、指令速度に起因する内回り誤差が必ず発生することから、指令速度によっても形状精度に差が出る。面と面との交線を明確化する加工については、指令速度が高速になるほど高い形状精度で加工することが難しくなる。

本統合 CNC システムでは、CAD データの形状情報を引き継ぐので、2 平面の交線をコーナ形状と認識し、エッジ角度に依存せず、稜線をコーナ頂点とする加工プログラムを生成する。このように特徴情報を幾何学的に正確に再現できる正確な加工プログラムを生成することができる。また、コーナ形状が指定されていることで、予めコーナ頂点の指令点を中心に加減速処理をするため、コーナ形状が確実に形成される速度制御が行われる。速度制御の結果で形状精度が決まる従来技術に対し、統合 CNC システムの特徴点減速アルゴリズムでは幾何学的に形状精度を決定してそれに合わせて速度制御を行うことにより、より精度が補償されるアプローチといえる。

加工指令のストラテジーとして、データモデル“Machining command information”に、指令速度 2000 mm/min、主軸回転数 10000 rpm、一方向切削であることという加工条件を与える。速度 2000 mm/min は、使用した工具の推奨切削条件の最大送り速度である。機械

加工においては加工の最高速度は、NC 工作機械の最大切削送り速度と主軸回転数を越えない範囲で、工具がもつ最高推奨速度が目安となる。切削速度が高速になるほど工具磨耗は進み、また、工具折損の危険性も高くなるため最高速度で指令することは一般的ではないが、本研究では、工具限界の条件下でも工具経路の誤差を抑制できることを証明するため、工具の最高速度である 2000 mm/min での工具経路誤差と加工時間を検証する。

ストラテジーとしては、特徴がエッジ形状の場合は、指定された速度まで減速することが選択される。エッジ部での減速速度は精度を補償できる速度として、機械特性や工具特性により決められるべきものである。本ケーススタディの加工条件からは、一刃あたりの送り量を極力小さくする（アルミ被削材に対して 0.025mm/tooth）500 mm/min を指定する。以上の条件で、速度 2000 mm/min の直線移動時に、特徴線を検出すると、特徴線近傍では 500 mm/min に減速するよう加減速時定数から減速距離  $d$  を求めて減速開始位置を判定する（図 4-4）。加減速時定数とは、加工実行中に速度変更が指令された場合に、現在の速度から指令速度に到達するまでの時間を指定する定数である。機械ショックが発生しない加速度となるよう、機械特性に応じて機械ごとに設定されている。本研究では、簡略化するため切削送り加減速は直線形加減速とする。速度変動と加減速時定数から減速距離  $d$  は、

$$\begin{aligned} a &= (V - V_0) / T_c \\ d &= V_0 T_c - a T_c^2 / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

である。ここで、 $a$  は加速度 [m/s<sup>2</sup>]、 $V_0$  は現速度 [m/s]、 $V$  は指令速度 [m/s]、 $T_c$  は加減速時定数 [s] を表す。従来技術では、CAM が NC プログラム生成時に使用した NC データが、実加工時の機械の NC データは設定に必ずしも一致するとは限らないが、統合 CNC システムは機械固有の NC データを使用してパスを生成するため、減速開始点の特定など NC パラメータに依存する部分でもデータが変更されても動的に対応して常に精度の高い加工パスを生成する。

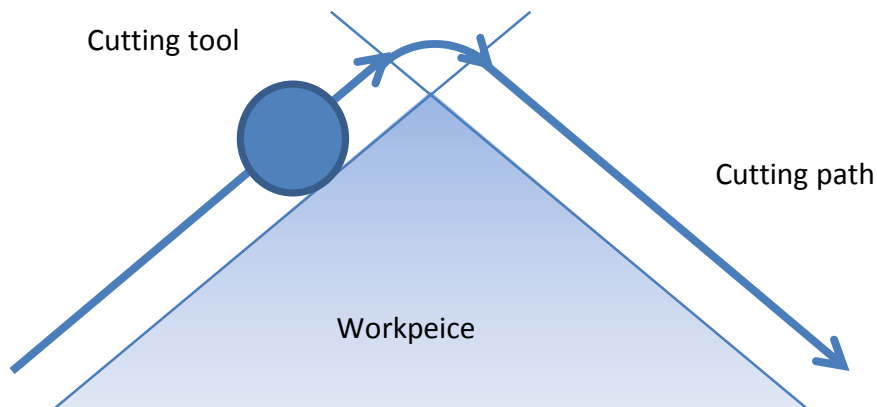


Fig. 4-5 Design shape and tool path

前述のように形状精度は加工プログラムの品質と速度制御という2つの要素により決まるが、本ケーススタディでは、従来技術においてもエッジ形状の頂点が明示的に指令されている加工プログラムを作成し、加工プログラムの品質は同等とする。2つ目の要素の速度制御に着目し、以下の3つのパターンで、統合 CNC システムと、従来技術との工具軌跡と加工時間を比較する。





- ① 統合 CNC システム(指令速度 2000 mm/min)
- ② 従来技術 F2000(指令速度 2000 mm/min)
- ③ 従来技術 F500(指令速度 500 mm/min)

#### 4-3-2 軌跡精度

エッジ角  $178^\circ$ 、 $176^\circ$ 、 $172^\circ$  の山形形状に対し、上記3種類の速度条件で、アルゴリズムを検証する目的で CNC からモータへの位置指令値を測定して比較する。さらに実加工による加工結果について形状精度を比較する。

##### 4-3-2-1 工具軌跡演算

CNC が加工プログラムを解析し、補間処理を行い速度制御した結果は、サーボシステムへの位置指令として出力される。この位置指令値を比較することで、制御アルゴリズムの特性を明確化することができる。位置指令値を測定してトレースした結果を図 4-6, 4-7, 4-8 に示す。以下に示すように、緑線は統合 CNC システム、オレンジ線は送り速度 2000 mm/min の従来技術である NC プログラム、青線は送り速度 500 mm/min の同じく NC プログラムそれぞれのサーボシステムへの位置指令である。点線は比較のために加工指令の工具軌跡をプロットしたものである。また、図 4-5 に示すように、実際のサーボシステムへの位置指令は、設計形状に対して工具径補正分オフセットした軌跡となる。

-  The integrated CNC system with feed rate 2000: green
-  The constant speed machining with feed rate 2000: orange
-  The constant speed machining with feed rate 500: blue
-  The commanded shape: dots

- ① 統合 CNC システムでは、送り速度 2000 mm/min に本アルゴリズムを適用して CAD データを継承する特徴点であるエッジ形状頂点近傍でのみ 500 mm/min に減速する。図 3-5 で示すように特徴点は直交座標系の座標値として指令され、工具経路はナノメートル単位で精密演算されるため、角度に依存せずエッジ頂点での誤差はほぼ確認できない。軌跡精度を維持することがむずかしい高速な送り速度 2000 mm/min の指令でもエッジ近傍で適切な速度まで減速する位置指令ができることを確認できた。

- ② 従来技術では、加工プログラムを解析し、実行中のブロックより先のブロックを先読みして移動距離と速度から演算して補間周期ごとの移動指令を作成する。この加工形状ではコーナ形状とみなされずコーナ減速はおこなわず、2000 mm/min で高速加工される。178 ° では、ほぼ直線とみなされ内回り量もほぼ発生しないが、エッジ角度が鋭角になるに従って内回り量が拡大するのが確認できる。
- ③ 従来技術の送り速度 500 mm/min 速度一定加工では、いずれの角度においてもエッジ頂点での誤差はほぼ確認できない高精度指令を行えた。500 mm/min は角度に依存せず軌跡精度を維持するに十分な速度であることがわかる。

統合 CNC システムの特徴点減速アルゴリズムに従った解析と速度制御による位置指令値は、加工プログラムに忠実に従った位置指令値を出力した。CAD の形状情報を継承する統合 CNC システムでは 500 mm/min と同等の軌跡精度を得るサーボ指令値を出力していることを確認できた。

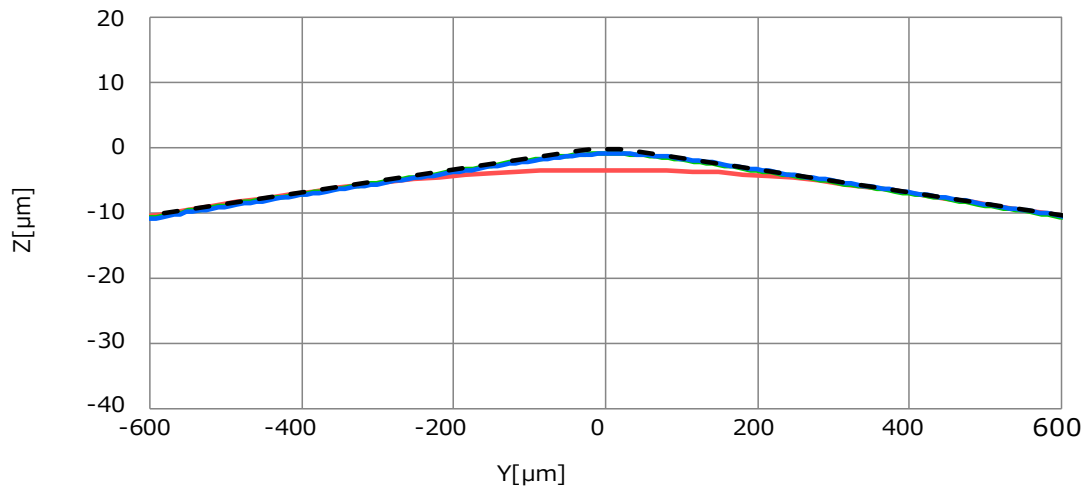


Fig. 4-6 Vertex angle  $178^\circ$

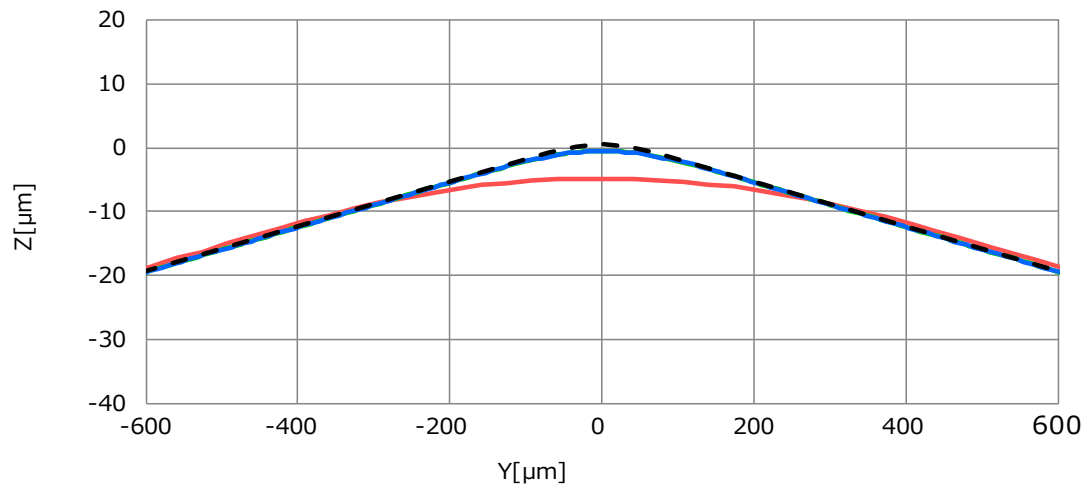


Fig. 4-7 Vertex angle  $176^\circ$

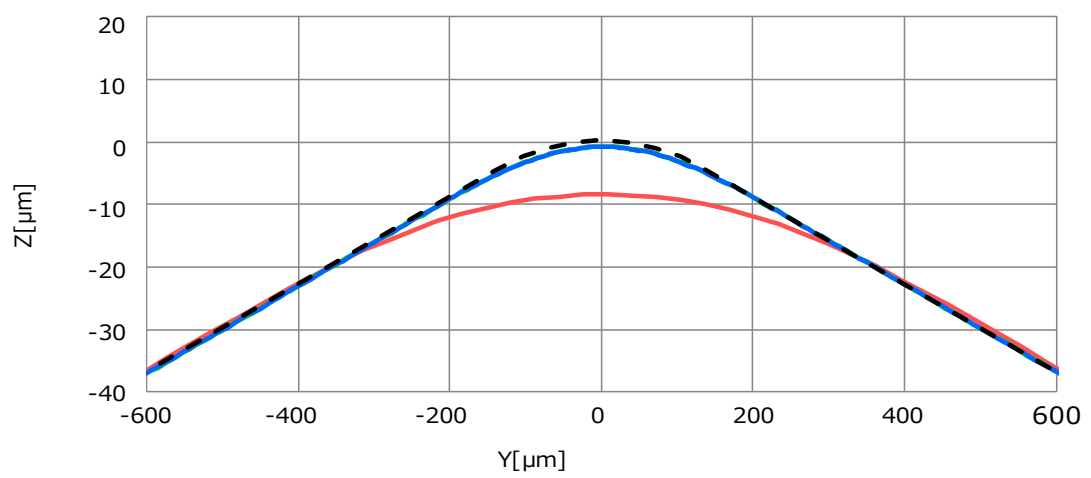


Fig. 4-8 Vertex angle  $172^\circ$

#### 4-3-2-2 実加工工具軌跡

小型マシニングセンタによる実加工を行い、レーザ測定器により加工結果を測定し、指令形状に重ね合わせて比較した。各条件での測定結果を、図 4-9, 4-10, 4-11 に示す。前節と同様に、緑線は統合 CNC システム送り速度 2000 mm/min, オレンジ線は従来 NC プログラムの送り速度 2000 mm/min, 青線は同じく NC プログラム送り速度 500 mm/min のそれぞれの工具軌跡である。点線は加工指令の工具軌跡をプロットしたものである。

- ① 統合 CNC システムの送り速度 2000 mm/min の特徴点減速アルゴリズムでは、角度に依存せずエッジ頂点の内回り量は  $1\mu\text{m}$  が測定された。特徴点減速アルゴリズムの減速距離の同定および専用の速度制御という特長により、送り速度 2000 mm/min の加工でもエッジ近傍で適切な速度まで減速して工具が通過したことが確認できた。
- ② 2000 mm/min ではコーナ形状とみなされず、コーナ減速されず位置指令に内回り量による誤差が生じている。エッジ角度が鋭角になるに従って工具軌跡誤差が拡大するのが確認できる。
- ③ 軌跡精度を保証できる速度として送り速度 500 mm/min の低速な速度一定加工では、いずれの角度においてもエッジ頂点の内回り量は  $1\mu\text{m}$  以内と安定した高精度加工を行えた。500 mm/min は角度に依存せず軌跡精度を維持するに十分な速度であることがわかる。

特徴点情報が加工指令に明示されている場合、加工実行時にインタープリタが加工指令を解析して減速距離と絶対座標上の減速開始点を計算し工具経路の補間処理を行う。本アルゴリズムは補間処理の演算負荷は軽微であることから、演算は補間処理時間の範囲内で完結している。補間処理演算の負荷が大きい場合には不必要に減速されるなどの弊害が発生するが、本ケーススタディでは減速開始点において工具軌跡に急激な速度変動は発生せず、面上に筋目が認められない良好な加工面質を得られた。統合 CNC システムでは形状精度は指令速度に依存せず、CAD で指定された形状情報を忠実に再現できることを実証できた。

特徴点減速アルゴリズムでは、CNC の設定パラメータである加減速時定数を使用している。当該 NC 工作機械の機械特性に適した制御が可能な反面、加減速時定数が短い場合には急激な加減速により工具刃先への衝撃を回避できず、加工面不良の原因となる可能性がある。また、加減速時定数が長い場合には特徴点において十分に減速されず工具経路誤差が発生し、形状不良が発生する可能性がある。今後は、統合 CNC システムでは特徴点情報に加え、CAD の形状情報を利用できることを活用し、設定時定数に過不足が認められた場合には、形状情報から加工不良を回避する減速距離を算出する改良を加え機能を拡張していく。

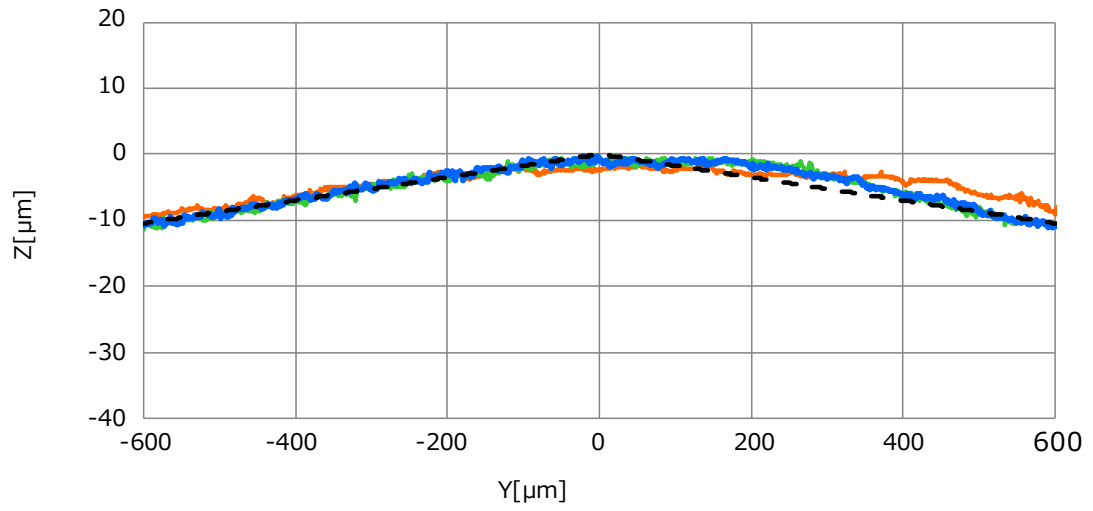


Fig. 4-9 Vertex angle 178°

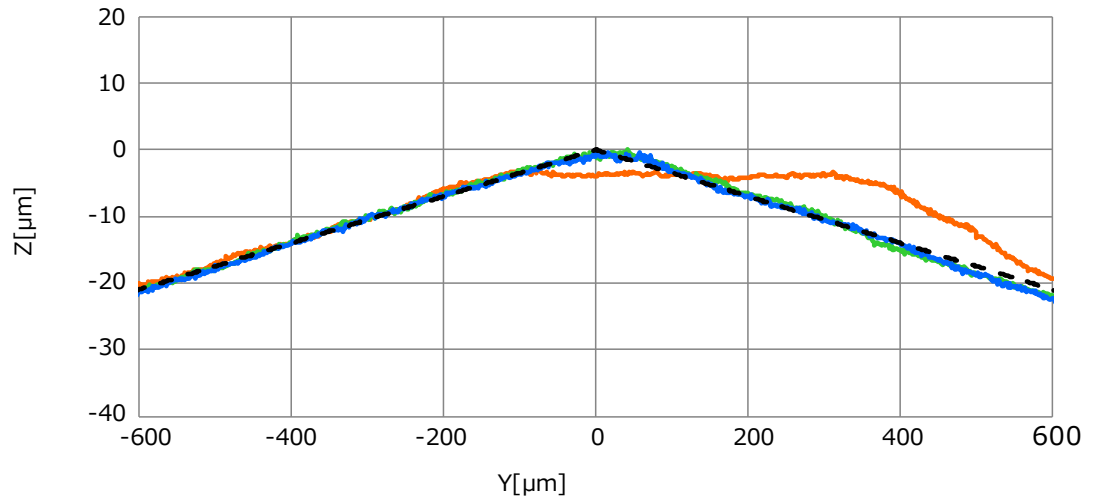


Fig. 4-10 Vertex angle 176°

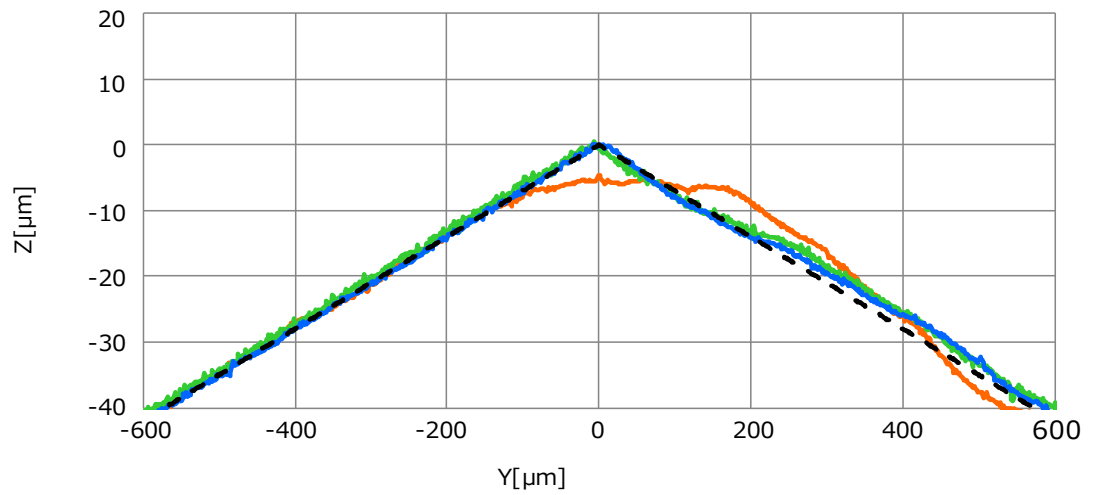


Fig. 4-11 Vertex angle 172°



Table 4-1 Comparison of processed results for each command speed

	Cycle time [s/line]	Inward turning amount [ $\mu\text{m}$ ]		
		178°	176°	172°
2000 mm/min constant speed	3.556 (100%)	2	4	6
2000 mm/min Integrated CNC system	4.323 (122%)	1	1	1
500 mm/min constant speed	11.988 (337%)	1	1	1

#### 4-3-3 加工時間

従来技術の送り速度 2000 mm/min 一定速度の加工時間 3.556 s を 100 % とすると、統合 CNC システムの特徴点減速アルゴリズムによる加工は 22 % 増の 4.323 s を記録した。特徴点における減速の影響は軽微であることがわかる。加工工具軌跡の誤差量が統合 CNC システムと同レベルであった送り速度 500 mm/min 一定速度の加工時間は 237 % 増の 11.988 s であった。加工中に速度変動が発生する場合、加減速に費やす時間の分、加工時間が長くなり、加減速部分を除く一定速度での移動時間に加減速時間の総和を加えた結果が測定時間となる。今回のケーススタディでは、統合 CNC システムの送り速度は 2000 mm/min とし、500 mm/min の 4 倍速であるが、2000 mm/min と 500 mm/min 間の速度変動がエッジ頂点前後で計 6 回発生するため、そのたびに加減速にかかる時間が蓄積された結果、加工時間は約 1/3 となった。統合 CNC システムのアルゴリズムを適用することで、速度変動時に加減速に費やす時間分加工時間が長くなることを考慮しても、加工工具軌跡の誤差量が統合 CNC システムと同等精度であった送り速度 500 mm/min の加工の約 1/3 の加工時間で実現したことになる。その結果を表 4-1 に示す。

このケーススタディでは、共通データベースの加工形状データの特徴点と加工技術データのエッジ形状減速の特徴点減速アルゴリズムを適用した。以上の結果から、統合 CNC システムでは、加工指令に特別な速度制御を意図的に付加することなく、現状の技術に比較してより速い指令速度で高精度な加工が可能であることを証明することができた。

#### 4-4 形状情報の活用

形状精度と面品位の向上には、設計情報と誤差のない工具経路計算が要求される。従来技術の NC プログラムにおける自由曲面を含む形状の工具経路は、指定された許容トレランスの範囲内で、連続する微小線分によって、曲線が表現されているため、曲面の接点上に正確に指令されている保障はない。微小線分を直線補間することで、微細な多面体によって近似された曲面を形成する。第 3 章で述べたように、STEP-NC 規格では、加工フィーチャ自由曲面は、工具経路パターンに替わり CL データを直接使用することができる。本研究では、自由曲面に関しては、CAM が出力する CL データを利用する。統合 CNC システムは、共有データベースの STEP 形式の CAD の設計形状情報を直接参照して、加工指令の形状精度を向上することを実証する。

CAM が生成する工具経路は、CAD の設計形状データに対して許容トレランスの範囲内に創成された面が曲面を近似するように配置され、幾何的な計算によって創成面上を工具が通過する座標として導出される。数値化のために内部的に近似した結果を指令点として出力していることから、既に誤差を含んでいる。近似した段階で曲率情報は失われるため、隣接経路で指令点位置が揃わない場合がある。現状の CNC は、実行時にプログラムを解析し、連続した指令点から曲率を推論して、曲線の工具経路を再作成している。指令点列からの曲線の推論であり形状のモデルをもたないことから、曲面を形成する隣接経路との整合性は考慮されない。工具経路の滑らかさは実現できるが、設計形状に対する経路誤差が発生する場合がある。図 4-12 に示すように、CAM トレランスに起因する工具経路と設計形状の間に誤差が発生する場合には、オーバーカット(削り込み)、アンダーカット(削残し)の位置が隣接経路で異なる。経路誤差による段差が加工面品位を低下させる要因となる。NC プログラム生成時に発生する経路誤差を排除する試みとして、白瀬らは、CAD データからあらかじめ NC プログラムを作成することなく、機械加工を行うシステムを開発した。工程設計・作業設計システムと仮想加工システムを統合して、素材形状と最終形状の 3 次元 CAD データを解析しながらリアルタイムに自律的な機械加工実現可能であることを切削実験で検証した<sup>[75], [76]</sup>。

統合 CNC システムは、共有データベースにある STEP 形式 CAD データの形状情報を参照することが可能である。加工指令に含まれる曲面の CL データに対し、CNC は推論ではなく直接 CAD の形状情報を参照して形状の上に工具位置が指令されるよう補正する。共有データベースを利用して CAD の形状情報が CNC に継承されて有効に利用できることで、設計形状を反映する有意な点群を再作成し、幾何的な誤差を排除した工具経路の加工指令を生成する。

本ケーススタディにおいては、図 4-13 に示すテストカット用ワークピースを使用する。このワークピースは、平面、ポケット、ボス、傾斜面がすべて曲面で構成される評価用ワークピースであり、NC 工作機械の加工面品位や加工時間という性能特性を定量的に評価する

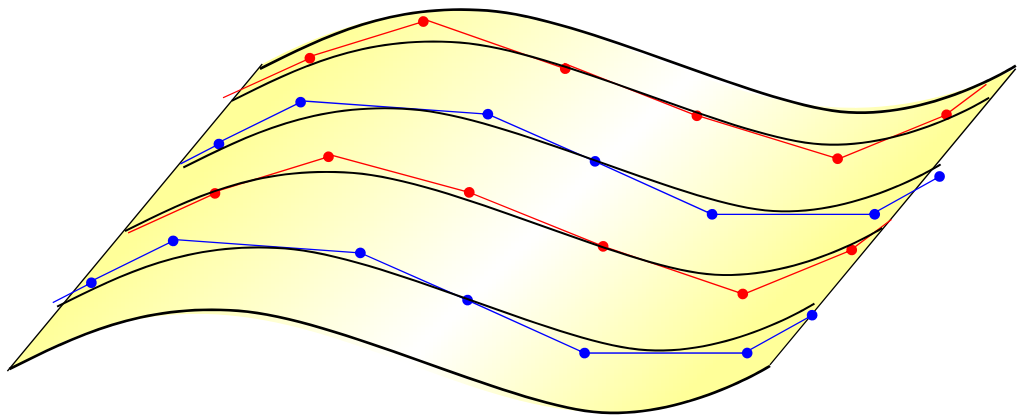


Fig. 4-12 Tool path sample of free-form machining



Fig. 4-13 Sample workpiece for freeform machining

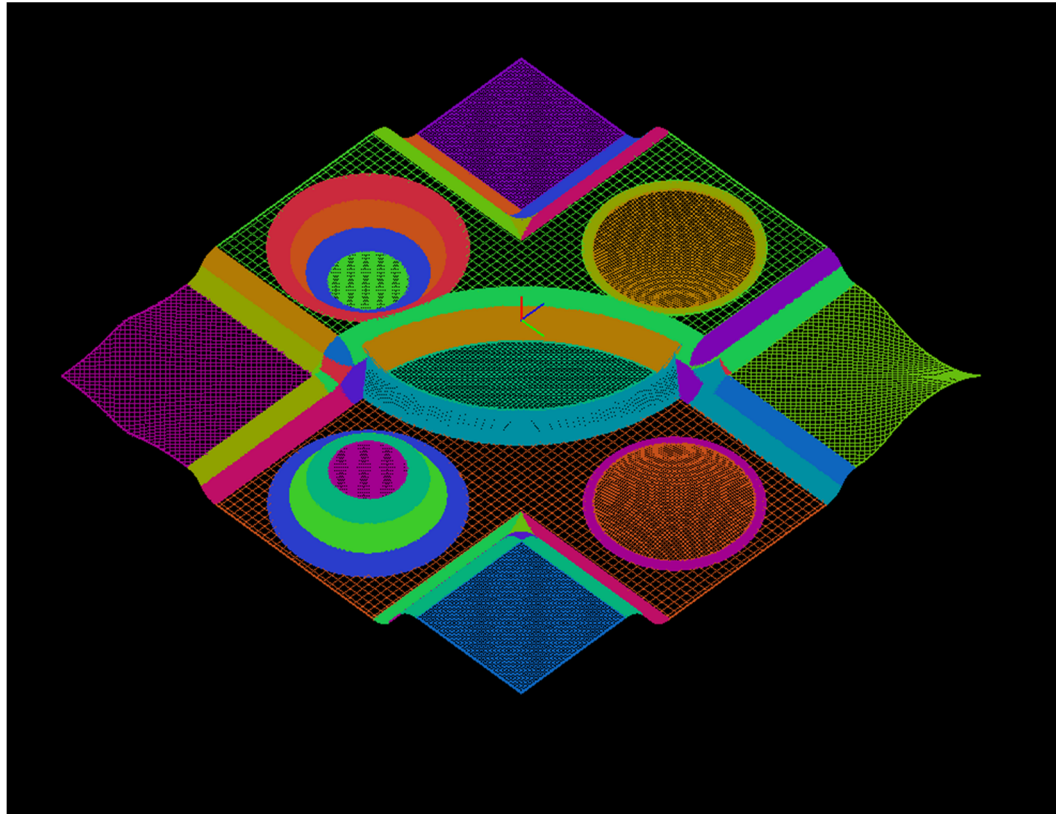


Fig. 4-14 CAD data of sample workpiece for freeform machining

ために使用される。図 4-14 に面ごとに色分けして示すが、面の総数が 60 になる複雑な形状であることがわかる。

このワークピースを用いて、3次元曲面について形状精度を評価する。加工リソース情報として、機械は小型3軸マシニングセンタ、被削材は調質鋼 (NAK80)、工具は直径 4.0 mm のボールエンドミルを使用し、加工指令は往復切削を選択した。後述する曲面の工具位置補正アルゴリズムは CL データの工具位置から CAD データ内の曲面の座標を逆探索するため計算量が多くなる。インタプリタで演算処理を行うと計算負荷が重いので、加工実行速度が遅くなる場合がある。そのため、CL データの工具位置補正処理専用のポストプロセッサを統合 CNC システムのアプリケーションソフトウェアとして開発した。CL データは、工具先端の中心位置を指定する工具先端点座標を工具位置で生成する。工具先端点の制御とは、工具先端座標と工具姿勢を加工指令として生成し、CNC が工具情報と機械構造から各軸の制御点を計算する技術である。本ケーススタディでは、ボールエンドミルの先端形状を半球として捉え、その中心位置を工具先端点として CL データを作成した。工具先端点を指令することで、工具寸法や工具種類の影響を受けず直接工具位置補正計算を行うことができる。

テストカット用ワークピース工具経路の CL データについて、トレランスに起因する加工

不良箇所を指摘し、統合 CNC システムで提案する工具位置補正アルゴリズムを利用して工具経路を改良する。統合 CNC システムが補正した工具経路が CAD の形状情報を正確にトレースしていることで明確になる補正前の経路との違いを、実加工結果で比較する。

#### 4-4-1 加工ストラテジー

自由曲面加工は、設計形状の曲面に接する線上に生成された工具経路で形成される。工具移動経路は、前述のように微小線分の直線補間として工具経路が生成される場合には、従来技術では、CNC が NC プログラムの指令点列から曲面を表現する曲線を推論して工具経路を再作成している。曲線を推論する従来のスムージング機能は、指令点列にもとづくスプライン曲線を出力する場合が多い。スプライン曲線を使用すれば、1本の工具経路としては滑らかな出力を得ることができるが、スプライン曲線は、もととなる NC プログラムの点列を含まない工具経路を算出するため、CAD で設計された曲面を成形する理想曲線を復元しているわけではない。隣接する工具経路間で指令点密度が異なる場合には、復元される曲線の形状も異なることから、隣接経路との段差は、加工面に筋目が発生するなどの加工不良の原因となる。

本統合 CNC システムでは、共有データベースにある STEP 形式 CAD データの形状情報を参照する仕組みを利用して工具が曲面に接するように工具位置を修正することで、曲面の理想曲線を復元する。隣接する工具経路との整合性は考慮されないが、すべての工具経路が幾何学的に同じ曲面上に配置されるので、工具経路間の段差を抑制し、高い面品質の加工面を得られる。

以下に、工具位置補正アルゴリズムを図解する。

- ① 工具がワークピースを切削する加工面は工具の切削点の軌跡である。図 4-15 は、工具位置 a-b 間を直線補間したときの加工面を図中赤線で示す。許容トレランスの範囲内で生成された工具経路は、加工形状に対して、a 位置ではオーバーカットが、b 位置ではアンダーカットが発生している。隣接経路で切込み量や削り残し量が異なる場合に、加工面不良が発生することがわかる。

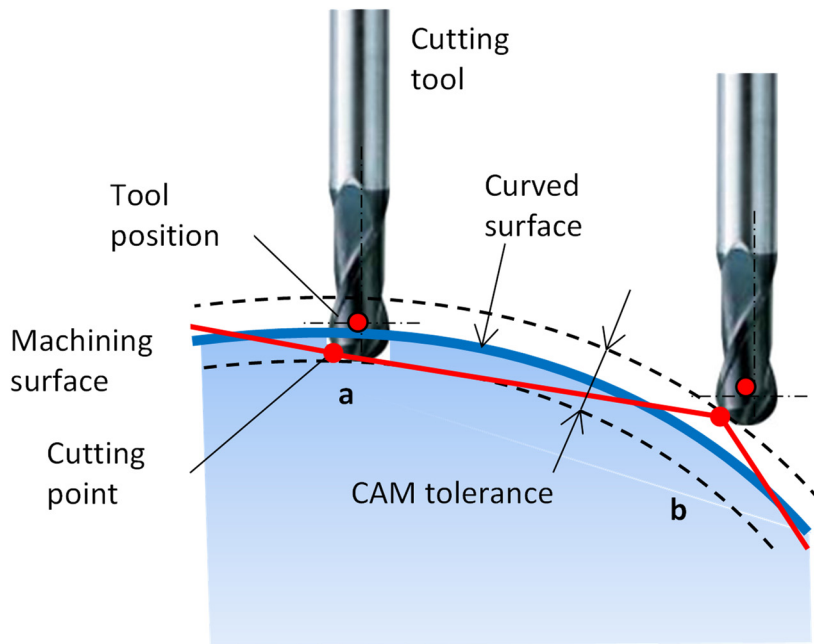


Fig. 4-15 Tool path by tolerance 10  $\mu\text{m}$

- ② 図 4-16 に示すように、すべての工具位置に対し、工具軸方向に加工形状との接点を求める。加工する形状情報は STEP 形式のファイルで記述され、形状は NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) 曲面の集合として表現する。曲面上の座標  $(u,v)$  に対し、工具位置  $(x,y,z)$  から逆探索を行う。

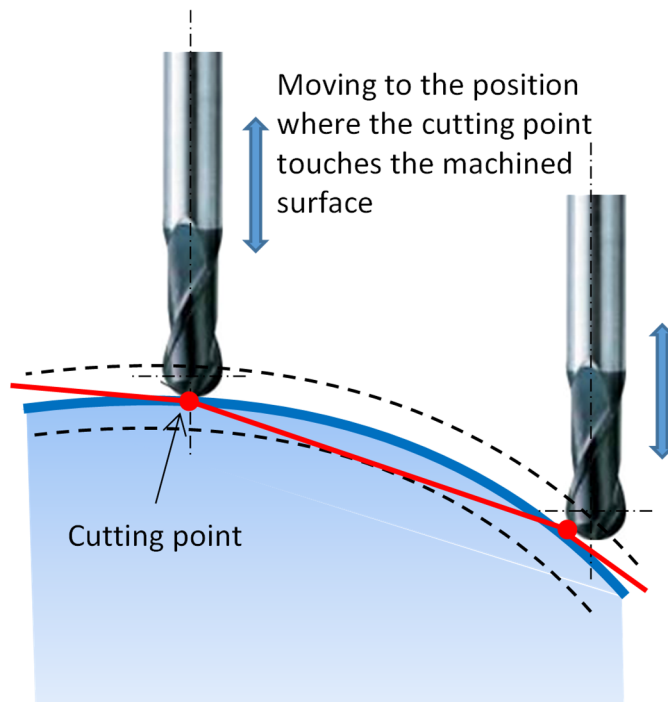


Fig. 4-16 Move command point to shape surface

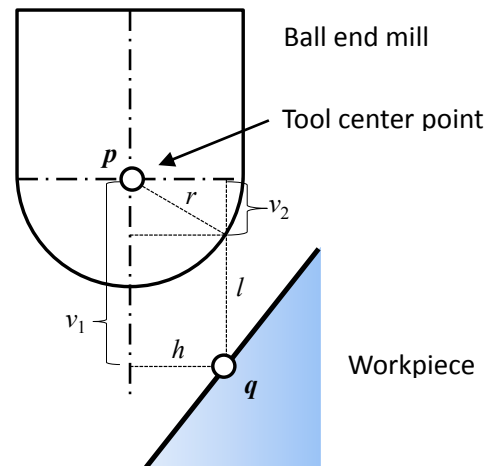


Fig. 4-17 Move tool axially until the distance between p and q is r

使用工具の情報は共有データベースから工具種類と工具径を特定した。図 4-17 に示す工具位置を  $\mathbf{p} = \langle p_x, p_y, p_z \rangle$ ，工具に最も近い曲面上の点を  $\mathbf{q} = \langle q_x, q_y, q_z \rangle$ ，工具半径  $r$  とし， $\mathbf{p}$  と  $\mathbf{q}$  の距離が  $r$  になるように工具を軸方向に移動させるために，以下のように補正量  $l$  を求める。常に  $h < r$  である。

$$\begin{aligned}
 v_1 &= q_z - p_z \\
 h &= \sqrt{(q_x - p_x)^2 + (q_y - p_y)^2} \\
 v_2 &= \sqrt{r^2 - h^2} \\
 l &= v_1 - v_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

工具を  $l$  だけ移動し，再度工具に最も近い曲面上の点を求め，補正量を計算する作業を繰り返す， $l=0$  となった位置を解とする。

工具が加工後の曲面に接する位置に，既存の指令点を工具軸の方向に移動し，移動後の位置が，修正された指令点の位置となる。

- ③ 図 4-18 に示すように，現在の工具位置 a と次の工具位置 b 間に，1 または複数の工具位置を追加する。現在の切削点を起点に次の切削点を結んだ線分と曲面の最大誤差が目標許容差以下になる工具位置を求める。

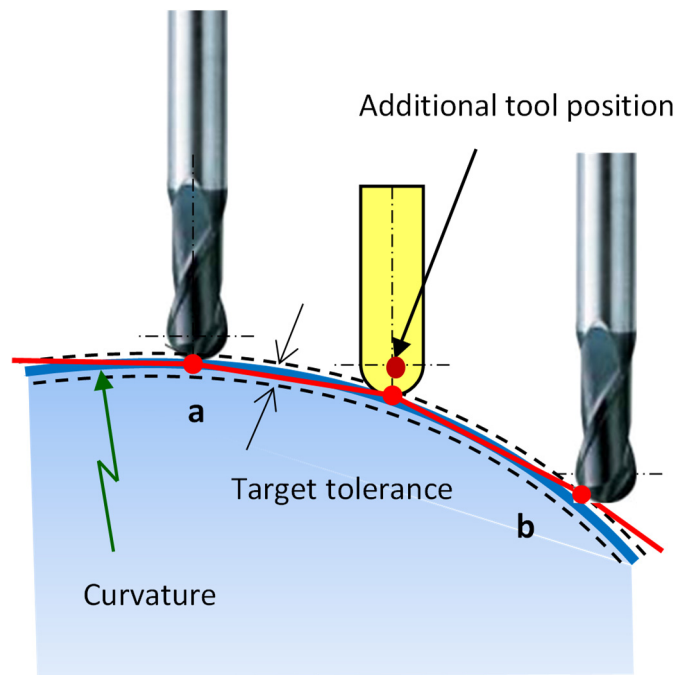


Fig. 4-18 Supplement command point

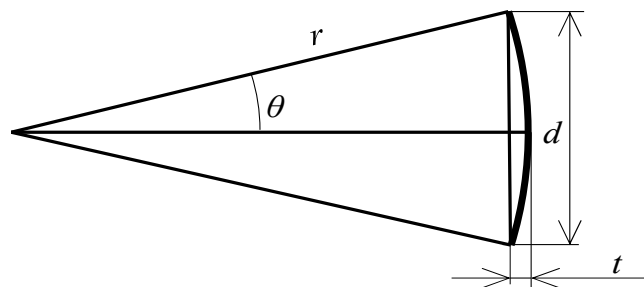


Fig. 4-19 Position correction and interpolation of commanded point

工具の進行方向ベクトルと工具の軸方向ベクトルによって定義される平面内での曲面の曲率半径を、工具と後加工面との接触点（切削点）での曲面の導関数から計算する。隣接する切断点間の適切な距離  $d$  は、曲率半径  $r$  と目標許容差  $t$  を用いると、

$$\begin{aligned}
 t &= r(1 - \cos \theta) \cong r\theta^2/2 \\
 d &= 2r \sin \theta \cong 2r\theta \\
 d &= 2\sqrt{2rt}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

と計算される。ここで、 $\theta$  は図 4-19 に示す円弧の中心角である。一般に、機械加工される曲面の曲率半径はトレランスよりもはるかに大きいため、 $\theta$  は 0 に十分に近いと



見なすことができる。切断点の間隔が  $d$  以下になるように、既存の指令点の間に新しい指令点を挿入することにより、図 4-18 のように修正された点列が生成される。

本研究の目的は、元の加工指令がいかなるトレランスで作成されたとしても、加工実行には理想的なトレランスを CNC が制御することである。本ケーススタディでは、補正前のトレランスは  $10\ \mu\text{m}$ 、目標許容差は目標トレランスとして  $1\ \mu\text{m}$  を選択した。CAM のトレランスは加工時間や機械の切削能力、CAM のプログラム実績などから決定されるが、部品加工ではトレランス  $10\ \mu\text{m}$  が一般的のため、今回のケーススタディにおける比較用の補正前の数値として選択した。補正の目標トレランスに  $1\ \mu\text{m}$  を選択したのは、金型加工では理想とされながらもプログラムブロック数が膨大となるため指定されることがまれである値だからである。

本研究の目的は、工具位置補正アルゴリズムにより、加工指令を高精度化することである。実加工では、指令速度に依存して工具軌跡は内回りが発生し形状誤差を生むが、本章では加工指令の幾何的正しさを追求するため、速度指令に起因する経路誤差は対象としない。また、一般に追加する工具位置の点数に比例して加減速に費やす時間が増加するため加工時間は長くなる。加工時間が補正前に対し大幅に長くなることは実用上問題となるため、工具位置指令追加数についての見極めが必要になる。

#### 4-4-2 軌跡精度

テストカット用ワークピースは、曲率半径の大きい 3 次元自由曲面を有しており、経路間段差が現れやすい形状である。実際に加工して面品質について比較し工具位置補正アルゴリズムの効果を検証する。

CAM トレランス  $10\ \mu\text{m}$ 、指令速度  $15000\ \text{mm}/\text{min}$ 、主軸回転数  $8000\ \text{rpm}$ 、ピッチ  $0.1\ \text{mm}$ 、深さ方向切込み  $0.03\ \text{mm}$  の往復切削であることという加工条件を与える。すべての工具経路において、速度指令および加減速条件を同一とし、速度依存の工具経路誤差の影響を低減する。

CAM トレランス  $10\ \mu\text{m}$  で同ワークピースの工具経路を生成し、実加工した。図 4-20 に示す加工結果の赤枠内を拡大した写真で確認できるように、筋目による加工不良が確認された。



Fig. 4-20 Machining result of test workpiece

図 4-20 の赤枠内当該部における，加工指令の工具経路と工具位置を表示したのが図 4-21 である．左側オリジナルの工具位置表示では，指令される工具位置の欠損が確認でき，隣接経路の不一致の要因と推測できる．同図右側は統合 CNC システムの工具位置補正と工具位置追加のアルゴリズムを適用した結果を表示している．指令される工具位置は整列してばらつきは改良され，さらに曲線を復元するために指令工具位置が追加されていることを確認できる．図 4-21 の緑線で示す稜線部(profile)の工具位置をトレースした結果を図 4-22 に示す．オリジナルの工具位置はプロファイルのトレース図赤線で確認できるように，指令工具位置が不足している部分については明らかに不要な切込み，および削り残しが発生している．統合 CNC システムによる補正後の緑線は，設計形状を忠実に復元した曲線を描いている．

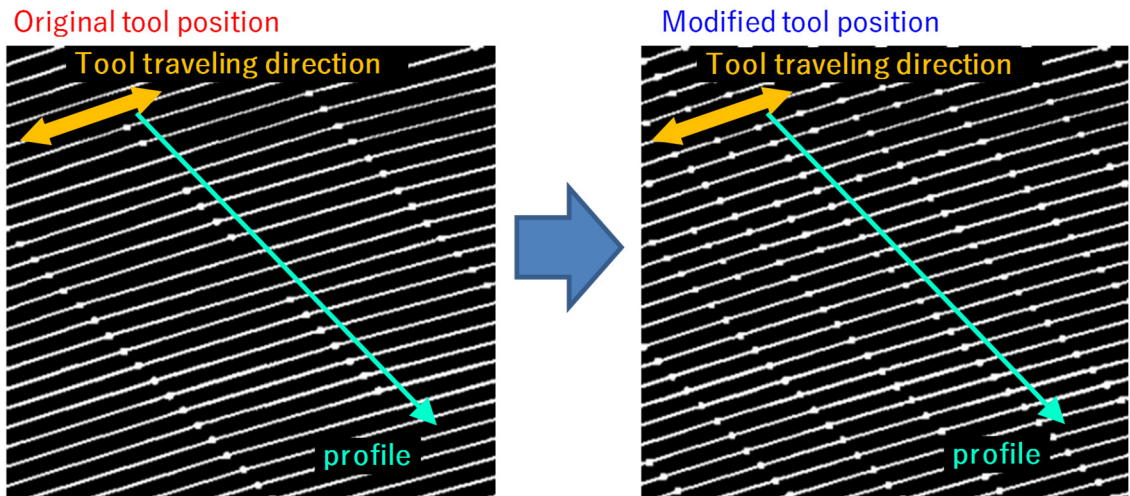


Fig. 4-21 Trace of tool positions

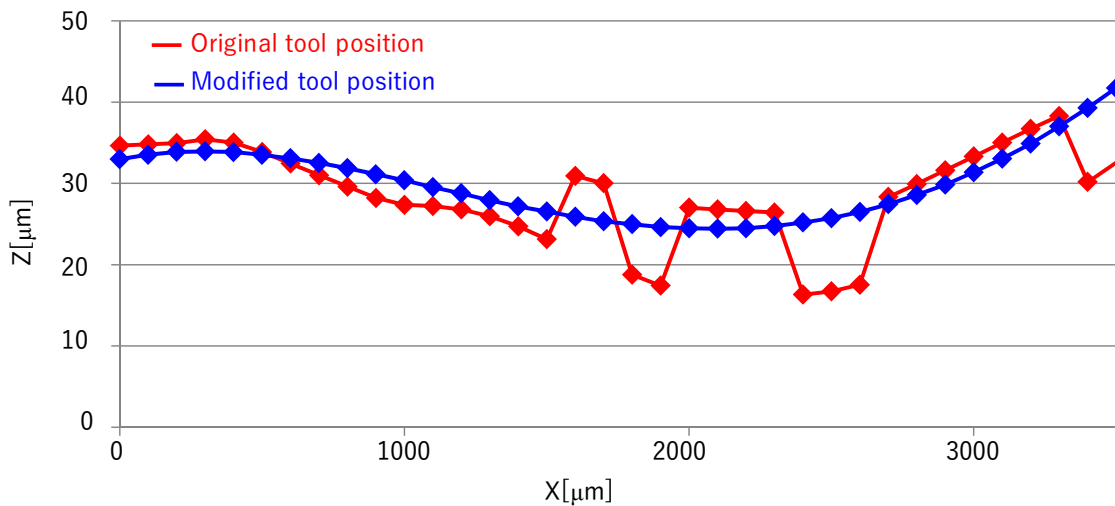


Fig. 4-22 Trace of tool positions on profile

実際に加工した結果を図 4-23 に示す。黄色の矢印で示す方向の往復切削である。左側オリジナルの工具位置による加工面不良は、右側の統合 CNC システムによる工具位置補正後では確認できない。図 4-23 の緑線で示す稜線部(profile)の工具位置をレーザー測定機で測定した結果を図 4-24 に示す。オリジナル工具位置では、工具位置が欠損している部分では稜線を表現できず、 $4\ \mu\text{m}$  と  $7\ \mu\text{m}$  の切込みが発生しており、加工不良位置と一致していることが確認できた。統合 CNC システムによる補正後は、指令の工具位置プロファイルを再現しており、工具位置を適正に補正している。

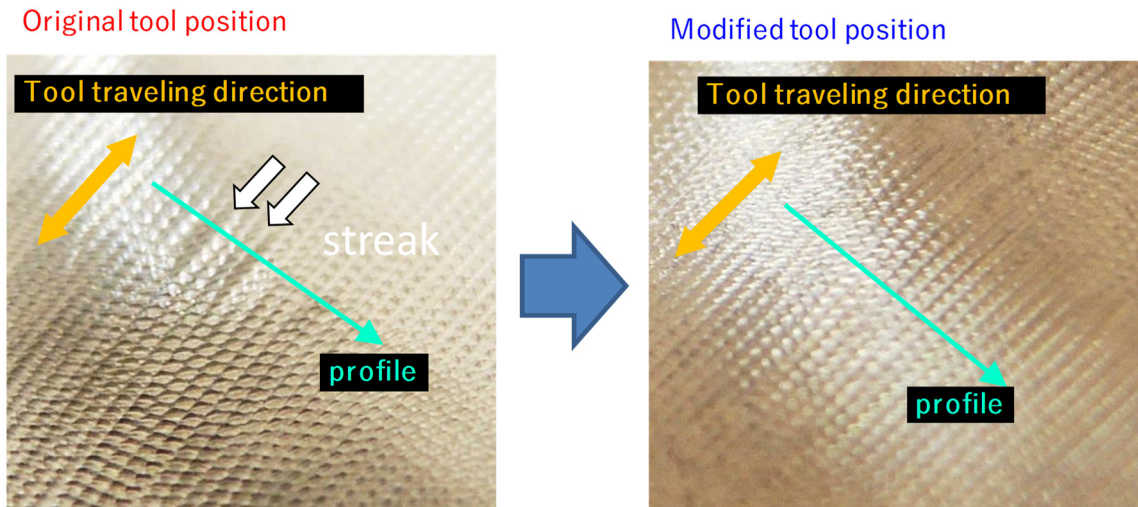


Fig. 4-22 Photos of machined surface

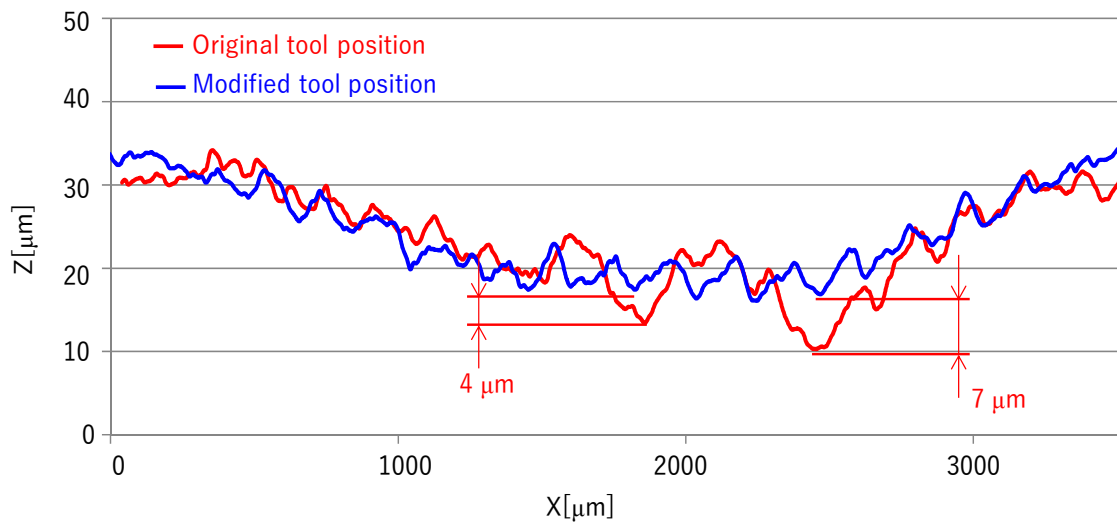


Fig. 4-23 Profiles of machined surface by laser measuring machine

3次元自由曲面加工において、形状精度を向上させる目的で、CADの設計形状を利用して、形状の曲面に接していない工具位置を曲面上に移動し、設計形状の曲率を保つために工具位置を追加する性能を持つ工具位置補正アルゴリズムを統合CNCシステムに実装した。曲面を加工するすべての工具経路に本記機能を適用することで工具経路の精度が向上し、経路間の段差を軽減した結果、良質な加工面を得られた。



#### 4-4-3 加工時間

CLデータを従来技術のポストプロセッサによりNCプログラムに変換して加工した結果と、統合CNCシステムの工具位置補正アルゴリズム専用ポストプロセッサにより工具位置を補正して加工した結果を表4-2で比較する。

補正後の工具位置数は195,233点となり、補正前62,615点の約3倍に増加したことで、設計形状の曲面上に工具経路を生成し、工具経路段差を発生させない良質な加工表面を得た。

工具位置数が約3倍増となったにもかかわらず、従来技術に比較して加工時間は30 min 53 sと補正前の30 min 56 sに対して差異は認められない。曲面上の工具位置数増加にともない工具位置が近接したことにより、工具位置間の工具進行方向ベクトルの変動量が減少したため加減速が発生せず、その結果、加減速時間を排除できた。また、補間処理演算の負荷も軽微であるため補間時間内に処理が完結し、加工実行速度の減速が発生していない。いっぽう、従来技術の工具経路は、補間処理演算の負荷は軽微であるが、工具進行方向ベクトルに変動があるため加減速が発生し、その結果、加減速時間に加え指令速度の減速部分が発生していることが考えられる。工具位置補正アルゴリズムでは、従来技術の工具指令点間の工具進行方向ベクトルに比較して変動が抑制されたことにより、工具位置数増加にもかかわらず、より高速に加工できることを確認した。

**Table 4-2** Comparison of machining time

	Conventional technology – Linear interpolation	Integrated CNC system
Processed surface		
Surface evaluation	Streaks due to steps between tool paths	Smooth surface without streaks
Command points	Original tool position 62,615	Modified tool position 195,233 (+132,618)
Machining time	30 min 56 s	30 min 53 s

工具位置数の増加は、形状精度と面品位を向上すると同時に、形状や増加数によっては演算負荷や加減速の発生から加工時間が増加する可能性がある。本ケーススタディのように、曲率に大きな変動がない場合では加減速に費やす時間が発生しないことからその影響は軽微であるが、実用化にあたっては、加工時間の増加率をシミュレートして形状精度と追加点数の最適解を見極めることが必要になる。

#### 4-5 結言

本章では、高い形状精度を実現するための加工指令を生成するために必要とされるが、現状の NC プログラムに不足している情報として設計形状情報を同定した。加工のプロセスチェーンの各プロセスで相互運用できる共有データベースとデータモデルに基づき、そのデータモデルを利用した CAD の設計情報を含む加工指令を生成した。実際に NC 工作機械に実装し加工し、その効果を検証した。共有データベースにもつ CAD の設計形状を直接参照して工具位置を補正することや、設計形状の特徴点を指定した加工指令を生成することから、従来方法で生成した加工指令に比較して、形状データがより忠実に被削材に転写されるという効果を確認できた。

## 第5章 統合 CNC システムによる生産性向上

### 5-1 緒言

実加工から加工技術者の経験に基づくノウハウや意図をデータとして収集し、加工条件を共有データベースに記録・更新できること、および共有データベースに蓄積された情報をもとに加工指令を評価指標にもとづき改良し、その効果を検証した。検証においては、評価指標を加工時間とし、実加工を行い、加工経験の浅い技量で生成された加工指令による加工時間と、共有データベースをもとに改良された加工指令による加工時間の比較を行った。統合 CNC システムは、実加工することにより得られる加工情報が改良理由とともに加工指令と対応づけて共有データベースに蓄積される。改良が加えられるたびに良質なデータが作られるため、加工指令作成時にこのデータを利用することで、より良い加工条件が再活用されるシステムとなっている。

### 5-2 加工セルによる加工実行情報の収集

統合 CNC システムを、図 5-1 に示す小型 3 軸マシニングセンタを基本とする加工セルに導入し、実加工からデータを収集して加工条件を共有データベースに記録・更新できること、および共有データベースをもとに加工指令を評価指標に基づき改良し、その効果を検証した。検証においては、評価指標を加工時間とし、加工経験の浅い非熟練機械オペレータの技量にもとづいて生成された加工指令による加工時間と、共有データベースを基に改良された加工指令による加工時間の比較を行った。

加工対象として、小型産業用ロボットのベース部品を選択した。被削材はアルミニウム合金 (ADC12) である。この部品加工では、代表的な加工フィーチャである Planar\_face, General\_outside\_profile, Hole を含んでいる。また、アルミニウムの鋳物に対する軽切削であるにもかかわらず、加工部位の剛性が不均一あるため、加工条件の選定により加工部位の形状精度の低下や面粗さの低下、あるいは、加工効率の低下が問題となっている加工対象である。

図 5-2 は、選定したベース部品を示しており、同図において緑で示した部分が加工部位で、それぞれが独立した Workingstep となっている。実加工により、Workingstep 単位で加工時間、実切削時間、空切削時間、主軸負荷、温度・振動といった各種センサ情報などを収集した。これらの情報の収集において、非熟練機械オペレータによる加工指令であるのか、熟練の機械オペレータによる加工指令であるのかは問わない。また、これらの情報収集において、同一の加工指令による加工であっても、加工現場の機械オペレータの技量により異なる加工指令の修正がなされることがあり、これにより異なる加工実行情報が収集される。



Fig. 5-1 Metal cutting cell

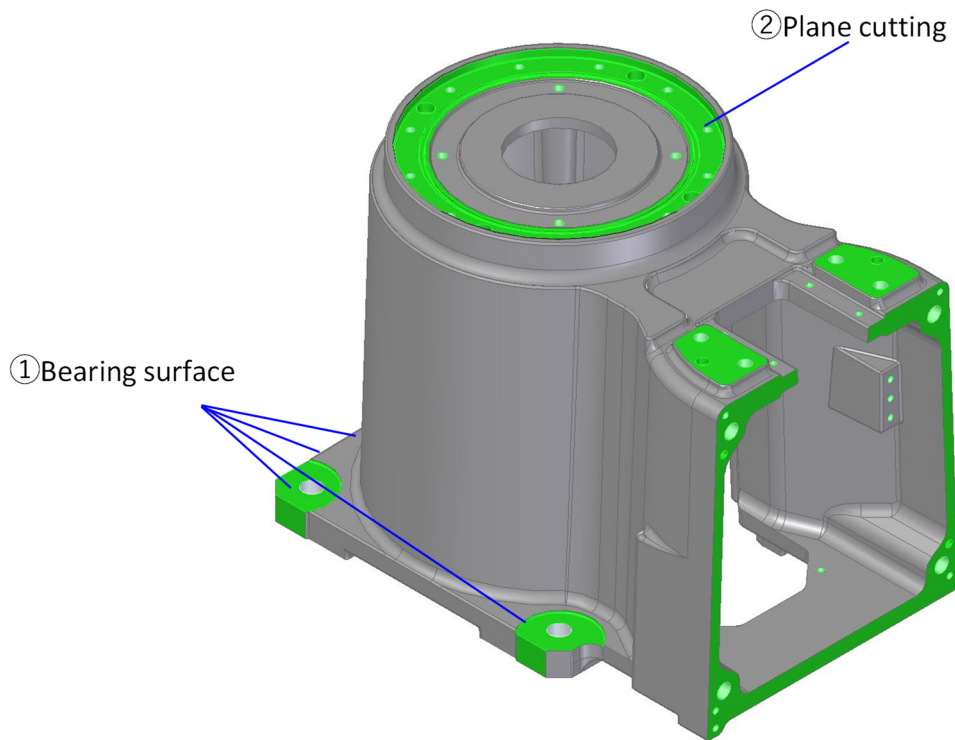


Fig. 5-2 Base part for scalar robot as first sample workpiece



### 5-3 加工実行情報に基づく加工技術情報の生成

本ケーススタディでは、評価の指標として加工時間を選択した。加工結果は検査工程で要求仕様に対して良否判定がなされ、加工結果情報が生成される。このとき、加工実行情報と加工結果情報から加工技術情報が生成される。統合 CNC システムでは、開発した専用 GUI により、加工技術情報に含まれる加工条件や切削時間などの情報を見える化し、その情報を基に機械オペレータが加工条件の改良について分析することを可能にしている。加工時間短縮を目的とする場合、図 5-3 に示す Workingstep ごとの主軸負荷や、図 5-4 に示す Workingstep ごとの加工時間を基に、機械オペレータが改良可能な部分を抽出して加工条件の修正・変更を行う。加工時間短縮という変更理由とともに、改良された加工技術情報を生成することにより、その情報が自動的に共有データベースに格納される。以下に、そのための 3 つの改良ルールを示す。

- ① 図 5-3 に示す主軸負荷が基準値より下回っている場合、基準値に至るように送り速度を上げる。
- ② 図 5-4 に示す加工時間より、非切削時間が長い Workingstep に対して、切削経路を見直し、非切削時間を短縮する切削経路を生成する。
- ③ 加工中の異音や加工結果の目視から、びびり振動が確認された場合、加工時間短縮が目的ではあるが、要求仕様を満足すること優先条件として、主軸負荷を下げるよう切込み量を小さくする。

非熟練機械オペレータであっても、図 5-3、図 5-4 に示されるような統合 CNC システムが提示する加工実行情報（加工時間、主軸負荷）より検討すべき項目を認識でき、その項目に関して共有データベースを利用してより適した加工条件を検索し、加工指令を改良できる。

切削経路の非切削パスの最適化は、既存の CAM システム機能でも可能であるが、CAM オペレータによる修正では、一般に安全性を担保するため余裕のある逃げ量や送り速度を設定する傾向にある。一方、統合 CNC システムは、加工現場の機械オペレータが経験に基づいて、機械ショックが発生しない範囲内で非切削パスの速度を上げる、非切削パス間をオーバーラップして移動距離を短縮するといった最大効果となる修正を行うことが可能である。

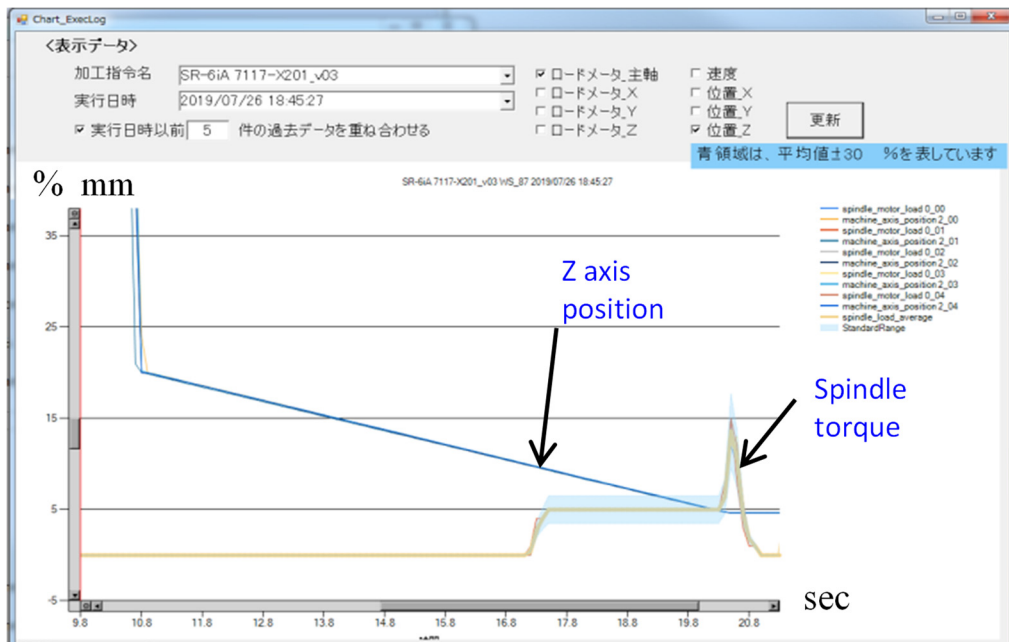


Fig. 5-3 Spindle torque waveform



Fig. 5-4 Machining results display

## 5-4 加工技術情報活用の検証

図 3-8 に示す統合 CNC システムの技術情報評価画面では、評価指標によってスコアリングされた技術情報を比較できる。加工指令作成時、与えられた評価指標に従って、加工対象となっている Workingstep の加工技術情報を共有データベースから検索し、加工時間が短い順に表示される。加工技術情報は、図 3-8 に示すように評価画面で表示されるため、CAM 及び機械オペレータはそれらを比較しながら、より適した加工技術情報を選択できる。加工技術情報を活用することの有用性を検証するため、以下において、異なる加工対象への適用について述べる。

### 5-4-1 加工対象 1

非熟練機械オペレータにより、図 5-2 に示す加工対象の図面を基に加工指令が作成された。同加工指令により、被削材としてアルミニウム合金 (ADC12) を用いて、図 5-1 に示す加工セルを用いた加工において 70 min を要した。

共有データベースの加工技術情報を用いて、加工リソース、被削材質、加工フィーチャ、工具の情報を基に、Workingstep ごとに加工時間の最も短い加工技術情報を選択することにより、非熟練機械オペレータが加工指令の修正を行った。結果として、加工時間は 48 min となり、30%の時間短縮を実現できた。同加工対象は、70 の Workingstep で構成されており、図 5-6 に最適化前の各 Workingstep の加工時間を 100%とした場合の加工指令修正後の加工時間を示す。以下に改良事項を示す。

- ① 図 5-6 において、①で示される Workingstep の加工は、図 5-2 の①で示す直径 4.8 mm の加工フィーチャ Planar\_face の座面加工である。加工サンプルには 4 箇所 of 座面加工があるが、テスト加工において、びびりを伴わない安定した加工ができた加工条件として工具軸方向の切り込み量 0.1 mm を確認し、その条件をすべての座面加工に適用して 12 回の加工で 1.2 mm の加工深さを得ていた。共有データベースの加工技術情報において、使用した工具では剛性が確保できる部位に対しては 2 mm の切り込み量の加工実績があることを確認した。図 5-5 に示すクランプ位置に近い部位では剛性が保たれるとの認識の上で、クランプ位置に近接する 2 箇所の Planar\_face の切り込み量を 1.2 mm に修正し、1 回の経路で座面加工を行うこととした。条件修正後の加工でも、主軸負荷は修正前に対し 3%内の変動に留まり、面品質に影響も無く、びびりも確認されなかった。このように剛性を考慮した加工条件を共通データベースから抽出し、加工条件を修正することにより、加工時間を 345 s から 43 s に短縮できた。
- ② 図 5-6 において、②で示される Workingstep は、図 5-2 の②で示す一次軸ジョイント部をエンドミル工具により加工している。共有データベースの加工技術情報を参照することにより、使用した工具の切削条件として、送り速度を 300 mm/min から 600

mm/min に、主軸回転速度を 2000 rpm から 2500 rpm に変更した。結果として、加工時間は 68 s から 35 s に短縮された。

修正加工指令による加工品の加工精度評価において、3次元形状測定の結果、CAD の設計情報にある形状の誤差(寸法公差, 幾何公差)と面粗さの指定の範囲内であることが確認でき、良品という検査結果が得られた。熟練機械オペレータにより作成された同加工対象の NC プログラムによる加工では、加工時間は約 56 min であった。統合 CNC システムによる非熟練機械オペレータにより作成された加工指令による加工では、熟練機械オペレータにより作成された NC プログラムによる加工より 15%加工時間を短縮した。熟練加工技術者が有する加工技術情報を共有データベースに蓄積していくことにより、非熟練技術者がその加工技術情報を利用して、より効率的な加工指令を作成することが可能になる。高度な加工技術情報を蓄積することにより、更なる高精度・高能率な加工が期待できる。

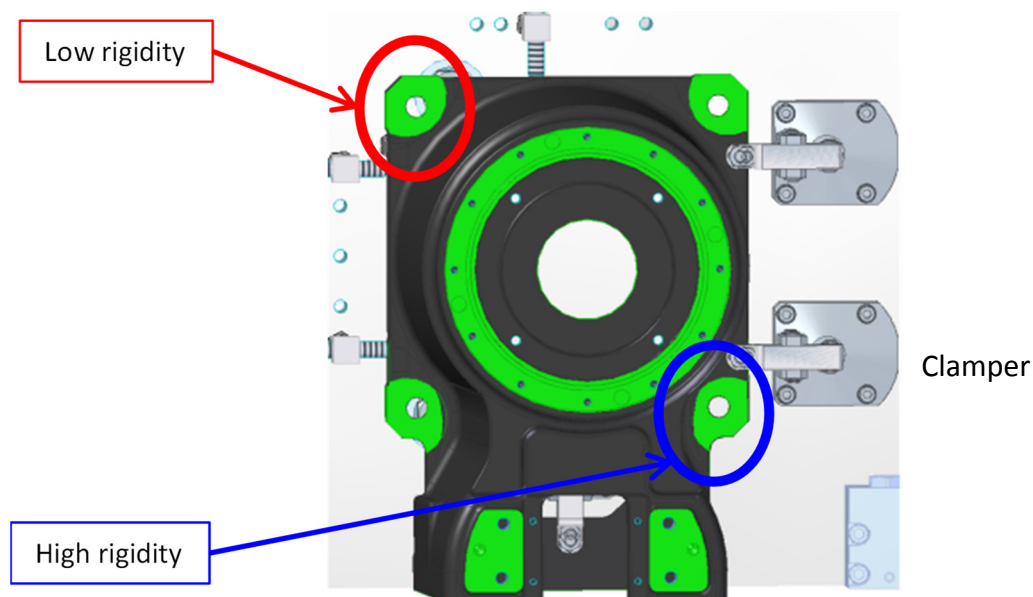


Fig.5-5 Rigidity depending on clamp position

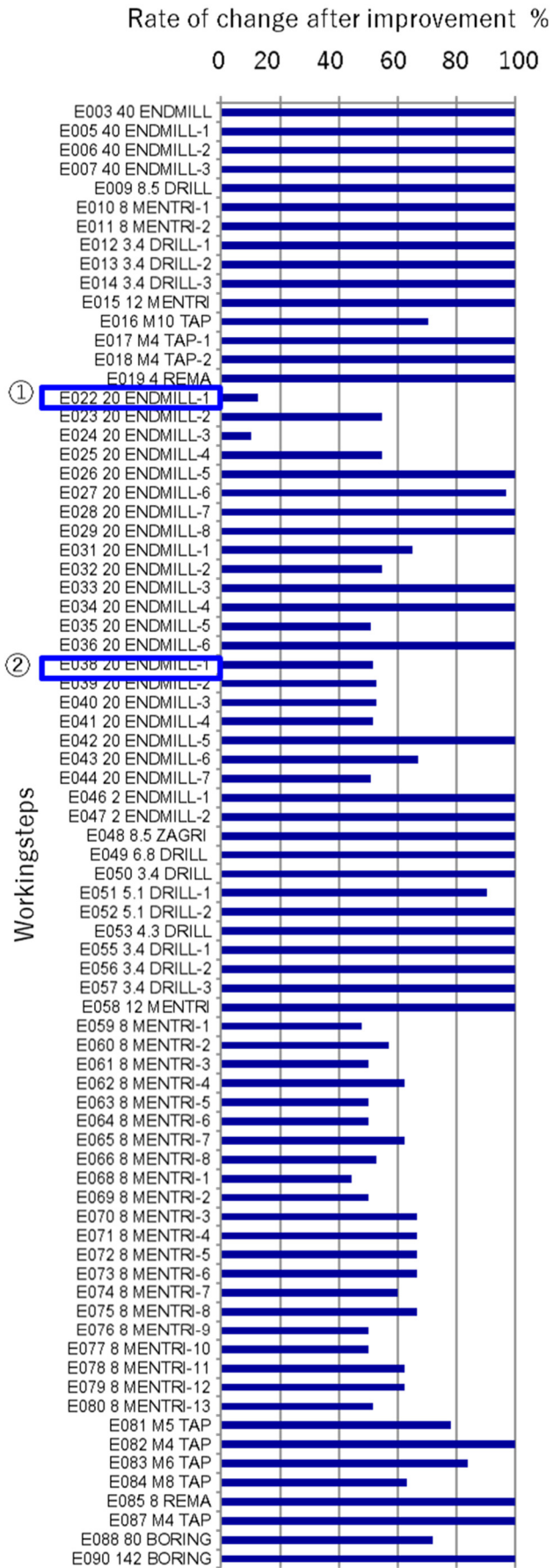


Fig. 5-6 Optimization of machining commands of first sample workpiece

## 5-4-2 加工対象 2

非熟練機械オペレータにより，図 5-7 に示す産業用ロボットの腕部品を基に加工指令が作成され，実加工を実施した．被削材材質はアルミニウム合金（ADC12）である．同加工指令による加工は 40 の Workingstep で構成されている．仕上げ加工の 5 つの Workingstep に対して，共有データベースの加工技術情報を基に加工指令の改良を試みた．図 5-8 は，改良前の各 Workingstep の加工時間を 100 %とした場合の改良後の加工時間を示している．

① 図 5-8 において，①で示される Workingstep は，図 5-7 の①で示す加工フィーチャ Planar\_face の仕上げ加工である．加工リソース，被削材材質，加工フィーチャ，工具の情報を基に共有データベースにおいて加工技術情報を検索し，同加工フィーチャに対する加工条件として指令速度 800 mm/min の実績があることを確認できたため，指令速度を 300 mm/min から 800 mm/min に修正することにより，加工時間を 45 s から 19 s に短縮できた．

② 図 5-8 において，②で示される Workingstep は，図 5-7 の②で示す加工フィーチャ Chamfering である．共有データベースの検索により，同加工フィーチャの加工条件として指令速度 1000 mm/min，主軸回転数 2000 rpm の実績があることを確認したため，指令速度を 500 mm/min から 1000 mm/min に，主軸回転数を 1500 rpm から 2000 rpm に修正することにより，加工時間を 30 s から 15 s に短縮できた．

仕上げ加工の 5 つの Workingstep に対して加工指令を修正した結果，加工時間が 2 min 27 s から 1 min 14 s と約 50 %短縮された．

本ケーススタディでは，加工経験の浅い非熟練機械オペレータが，経験していない加工に対しても試行錯誤することなく，熟練機械オペレータと同等の加工時間を達成したことを確認できた．今後は，このシステムを運用して加工を重ねていき，加工技術情報・加工実行情報が蓄積され有効に利用されることで，生産性を向上し，加工品質を改善する加工指令を生成する事例を累積していく．

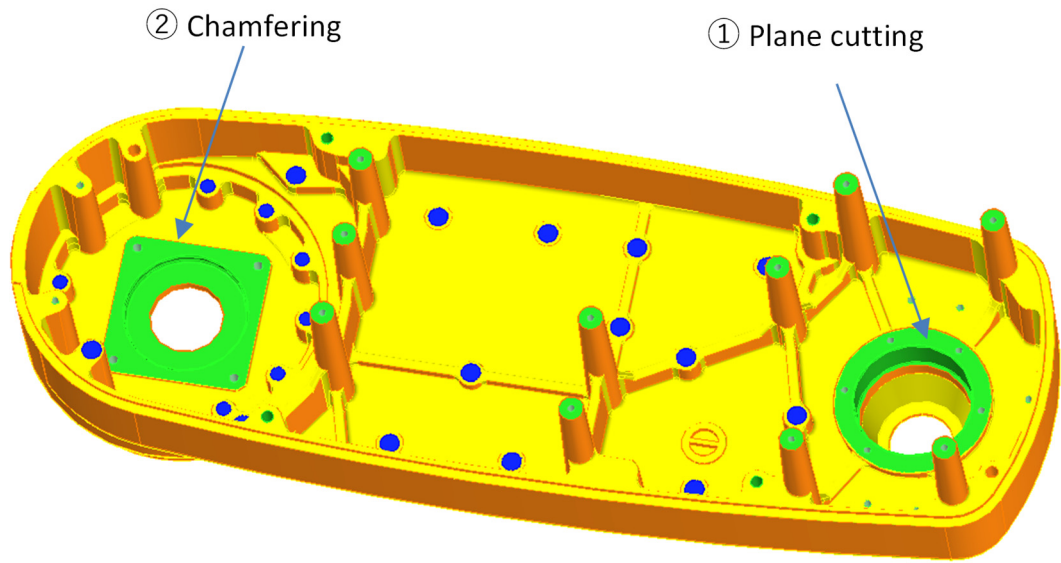


Fig. 5-7 Part of robotic arm as second sample workpiece

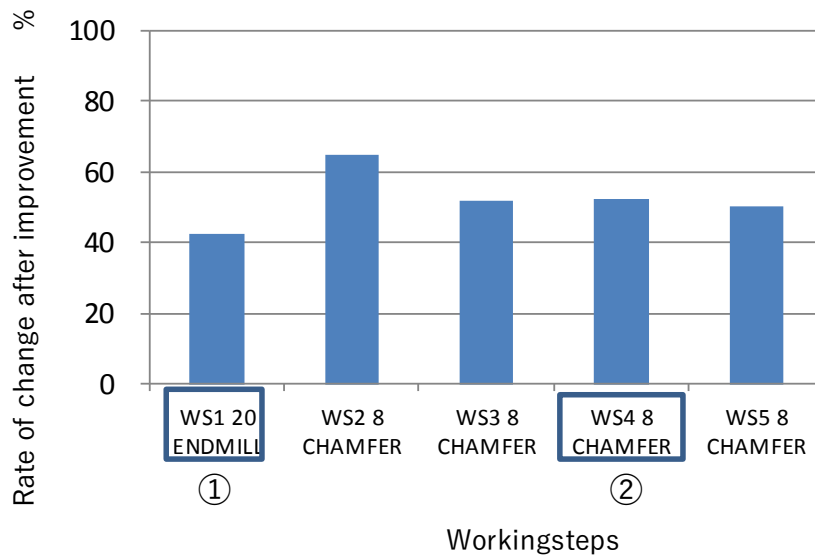


Fig. 5-8 Optimization of machining command of second sample workpiece

### 5-5 結言

現在の加工現場では、加工品質、加工時間、加工安定性などは、CAM および機械オペレータの習熟度に依存している。この問題に対して、本研究では、経験に依存せず高品質な加工指令を生成できるようにするため、加工情報を共有データベースとして構築し、加工現場

で修正された加工情報を再利用できる統合 CNC システムを開発した。

本章で実際の加工セルに統合 CNC システムを構築し、非熟練オペレータでも熟練オペレータと同程度あるいはそれ以上の加工品質、加工時間、加工安定性を確保できる加工指令を作成できることを確認した。新たな加工対象であっても、類似の条件の良品加工の実績を活用し、高品質な加工指令を作成できた。統合 CNC システムは、改良のサイクル機能を有しており、オペレータは共有データベースから、より適した加工条件を選択できることを確認できた。

このようなシステムでは、運用を続けることで加工に関する膨大な情報が収集される。有意義な情報とそうでない情報の分離やデータ保存、さらに活用法について、今後議論が必要である。本研究ではオペレータの経験と知見による加工条件の改良を実現したが、今後情報量が増えていくに従ってオペレータによる条件選択および確認負担が大きくなっていく。オペレータに代わり、ビッグデータを解析してオペレータに対して加工条件改良を提案する機能がシステム活用のための重要な要素技術となる。継続的および汎用的に精度向上や生産性向上を目的にデータベースを活用していくためには、ビッグデータ分析のための統計的手法や診断機能の利用が必要である。本論文で示したように、統合 CNC システムはデータ共有と利用のためのプラットフォームである。共有データベースを有効に利用して自ら改良条件を提示する機能開発に発展させていく。



## 第6章 結論

CNC に対する高速高精度と生産性の向上への要求はますます高くなっている。高精度と高速は同時に実現できてこそ意味がある。製造現場においては、高い形状精度を実現しても、加工時間が不必要に長くなるとは生産効率が低下する。また、労働人口減少の時代に対し、生産効率や高速高精度加工のためには、生産技術者が長年の経験で得た知見を共有し、共通に活用できる仕組みが必要である。デジタル製造の情報端末として CNC は、複合的な領域を制御することが可能になったことから、演算の高速化以外のアプローチで高速高精度を実現できる。加工プロセスチェーンの他プロセスの情報を共有し、必要な情報を自ら獲得して制御に活用することで加工精度を向上する。加工実行時に得られる情報を、改良情報として共有化し、次の加工指令作成時に再活用することで、加工効率を向上できる。本研究では、以上の機能と特長をもつ統合 CNC システムを開発した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

第1章では、CNC は NC 工作機械を制御することで高速で高精度な金属加工を行うという基本的な役割、および、製造業のデジタル化にともない、周辺機器も含めた情報端末としての役割が拡大していることを述べ、高速高精度な加工と生産性向上への市場要求について示した。さらなる高速高精度化と生産性向上を実現する上で、現在の NC プログラムの情報不足と、情報の獲得と再利用の仕組みの欠如という従来の CNC の制御方法による問題点を明らかにした。情報共有化には、現在の加工プロセスチェーンには情報の相互運用性の欠如に由来する問題点があることを指摘し、本研究の目的である、情報の相互運用性を実現する手段として、共有データベースとデータモデルの構築という情報共有のシステム構築について提案した。

第2章では、NC 工作機械の成り立ちと、CNC はコンピュータ化されたことにより、高速演算による高精度加工や知能化というコンピュータの得意分野と機能融合し技術的發展を遂げたことについて述べた。多くの機器が相互に通信しあうデジタル製造業においては、CNC は工作機械の制御に加え、製造 IoT の情報処理の役割も担う。ハードウェアやソフトウェア単体の機能強化に加え、IoT 時代の CNC の役割と今後の課題について考察した。CNC は今後も製造業において、機能を向上させながら、また役割を広げながら重要な役割を担うことを示した。

第3章では、第1章で述べた CNC の高速高精度機能開発の技術的課題に対する提案として、加工プロセスチェーンの他のプロセスと CNC の情報の相互運用性を高め、他プロセスが生成する情報を有効に利用、さらに、再活用できる仕組みを考察した。本研究で提案し開

発する統合 CNC システムの基本構造である、共有データベースと共通インタフェースとなるデータモデルが、CAD、CAM、CNC および工作機械の情報を共有し、相互運用性の低さや情報の再利用を改善することについて述べた。本研究で独自に開発した加工指令は、CAD データのような他のプロセスの情報利用を可能とし、高精度な加工指令を生成に利用する。実加工で得られる加工改良データを再利用可能とし、機械オペレータの加工の改善行動を蓄積して再活用することで生産性を向上する。共有データベースにより、加工プロセス間での情報の相互運用性の低さを改善することで、共有した情報を有効活用できることを説明した。

第 4 章では、高い形状精度加工のために、現状の NC プログラムに不足している情報を同定し、共有データベースの CAD の設計情報を活用した CAD 情報を含む専用の加工指令と、CNC の制御アルゴリズムについて詳細に述べた。本研究のために拡張したデータモデルを含む CAD、CAM、CNC、工作機械における情報を共有データベースに格納・共有し、加工指令を作成するための要件である、加工条件、加工戦略、工具経路を作成する各プロセスにおいて常に形状データから抽出したデータを参照できるシステムを開発した。CAD の設計形状の特徴点を認識して加工指令を生成することから、従来、工具軌跡の誤差要因であった速度制御の影響を排することができること、および、CAD の設計形状を直接参照して指令点を補正することで、従来方法で生成した加工指令に比較して、設計形状データがより忠実に被削材に転写されるという効果を確認できた。

第 5 章では、実加工で得られた振動などの機械データ、および機械オペレータの経験に基づくノウハウや意図を共有データベースに記録・更新し、加工指令を評価指標に基づき改良し、常により良い加工条件が再活用されるシステムを開発した。このシステムでは、実加工で得られた情報を、評価指標にもとづき加工改良データとして提示することで、オペレータは加工の目的に合わせてより良い加工条件を選択できる。非熟練機械オペレータが共有データベースを基に加工指令を改良し、熟練オペレータと同程度あるいはそれ以上の加工指令を作成できることを確認した。新たな加工対象であっても、類似の条件の良品加工の実績を活用し、高品質な加工指令を作成できた。統合 CNC システムは、改良のサイクル機能を有しており、オペレータは経験に依存せず共有データベースから、より適した加工条件を選択し高品質な加工指令を生成できることを確認した。

統合 CNC システムの基本機能は、NC 工作機械における加工に必要な情報を、データモデルとして共有データベースに収集し、データの中から必要な情報を分析して取得し、制御として実加工に反映させることである。統合 CNC システムの研究成果として、CAD の設計情報を利用して、幾何学的に形状情報に従って加工指令を補間制御する技術、および指令点を補正する技術は、実用面から NC 工作機械の加工の高精度化に貢献すると確信する。

また、加工実行時に収集する情報から機械オペレータの知見を加工技術として利活用する技術は、熟練オペレータの知見を共有データとして蓄積していくことで、労働人口が減少していく将来の製造業においても継続的に生産性向上を実現するものである。このシステムにおいては、他プロセスの情報を利用でき、加工実行結果から改良情報を収集できるという利点がある反面、増加していくデータに対するストレージ供給問題、ビッグデータの中から有用な情報を取捨選択するための技法の検討、評価の手法の複合化・知能化、および、信頼性を確保するために悪意あるデータの判別と排除の機構といった課題に対する機能開発継続が必要である。また、システムとしての安全性を保障するためには常に安全機能を最新の状態でできる機構が必要である。実用化にあたっては、AI を活用した選択アルゴリズム開発や、安全技術を取り入れたシステム設計が重要となる。いずれの機能も、情報分析機能を深耕拡大することで、加工指令の工具経路の高精度化や加工条件の改良の自動決定を知能化していくことにつなげたい。

従来の CNC は制御と数値データを装置内に完備する自己完結型機構である。基本的にはスタンドアロンであることは、外乱の影響を低減し、外部からの攻撃を遮断できることから機械安全のためには必要な考え方であった。その反面、外部接続の制限により、機能拡張やデータ拡張に対しての柔軟性に欠けていた。統合 CNC システムは、共有データベースと共通インタフェースとしてのデータモデルという基本構造の上に多様なアプリケーション機能を搭載でき、CNC の機能を拡張するプラットフォームである。プラットフォームには、生産要求に応じて必要な機能を随時追加・削除を可能とすることで、機能的に柔軟な CNC の実現が可能になる。さらに、アプリケーションソフトウェアやデータベースは、必ずしも機械に搭載される必要はなく、モジュールとして加工システムに搭載することで、複数の NC 工作機械を制御する実行形態も実現可能である。本研究では、データモデルによる情報の相互運用性を実現し、共有データベースを活用するアプリケーション機能として、工具経路の高精度化、および機械オペレータの知見の活用を実現した。将来的には、プラットフォームとモジュール化したソフトウェアコンポーネントから、複数の統合 CNC システムが複雑な演算を分散処理することで従来の高速高精度加工の限界を超える分散型 CNC を実現し、新しい製造形態の創出につなげていきたい。

## 謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に在学中、同研究科 青山英樹教授のご指導のもとで行われたものである。同教授より賜ったご指導とご鞭撻に厚く御礼申し上げます。

ご多忙中の貴重な時間を割かれて本論文をご査読いただき、有益なご助言とご指導を数多く賜りました、慶應義塾大学大学院理工学研究科 村上俊之教授、閻紀旺教授、柿沼康弘教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、実験設備の提供、実験の協力など、細部にわたりご支援いただきましたファナック株式会社、同社の水野徹氏、他多くの皆様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] JIS B 0181 : 1998, 産業オートメーションシステム－機械の数値制御－用語.
- [2] 輸出貿易管理令（昭和 24 年政令第 378 号）, 経済産業省.
- [3] JIS B 0134 : 2015, ロボット及びロボティックデバイス－用語.
- [4] アイコクアルファ株式会社 Official Home Page, from <https://www.aikoku.co.jp/ap/products/index.html>, (accessed on May 10, 2020).
- [5] JIS B0105 : 2012, 工作機械－名称に関する用語.
- [6] 原田勉：新たな技術的収斂の達成-ファナックにおける技術革新の事例分析(Another technology convergence - Case studies of technical change in FANUC), 神戸大学研究年報, 44, (1998 年) 87-104.
- [7] 工作機械の設計学(基礎編), 日本工作機械工業会, 2020, 10, ISBN:9784990443061.
- [8] ISO6983-1 : 1982, Numerical control of machines-Program format and definitions of address words.
- [9] Valilai, O.F., Houshmand, M. : INFELT STEP: An integrated and interoperable platform for collaborative CAD/CAPP/CAM/CNC machining systems based on STEP standard, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 23, No.12, December 2010, pp.1095-1117.
- [10] Wang, X.V., Xu, X.W. : A collaborative product data exchange environment based on STEP, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 28, No.1, 2 (January 2015), pp.75-86.
- [11] Danjou, C., Le Duigou, J., Eynard, B. : Closed-loop manufacturing process based on STEP-NC, International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol. 11, No. 2(1 May 2017), pp.233-245.
- [12] Danjou, C., Le Duigou, J., Eynard, B. : Integrated platform from CAD to CNC: A survey, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol.409(2013), pp.130-139.
- [13] Yamazaki, K., Hanaki, Y., Mori, M., and Tezuka, K. : Autonomously Proficient CNC Controller for High-Performance Machine Tools Based on an Open Architecture Concept, Annals of the CIRP, Vol.46-1(1997), pp.275-278.
- [14] 篠木優作, モハマド・ミラジ・イスナイーニ, 佐藤竜太, 白瀬敬一: 過去の加工工程データを活用して新しい NC プログラムを生成する加工工程計画システム, 日本機械学会誌, Vol.81, No.832 (2015), pp.15-00280.
- [15] Pease, W. : An Automatic Machine Tool, Scientific American, Vol.187, No.3(1952-09), pp.101-115.
- [16] Parsons, John T., and Frank L. Stulen. : Motor Controlled Apparatus for Positioning

- Machine Tool. US Patent 2,820,187. 1958-01-14.
- [17] 応用機械工学, 大河出版, 1988, No.4-No.5.
- [18] Schultz, H. : High Speed Milling of Aluminum Alloys, High Speed Machining, Proceeding of ASME, (1984), 241.
- [19] Schulz, H. and Moriwaki, T. : High-Speed Machining, Ann. CIRP, Vol.41, No.2(1992), 637.
- [20] 帯川 利之 : 切削加工の高速化, 超高速化, 生産研究, Vol.59, No.6(2007), pp.471-476
- [21] Gardner research : World machine-tool output and consumption survey 2015.
- [22] 工作機械統計要覧, 日本工作機械工業会, 2019.
- [23] 日本の NC 工作機械 30 年のあゆみ, ニュースダイジェスト社, 1987.
- [24] 日本工作機械産業のあゆみ, 日本工作機械工業会, 2015, 12.
- [25] 2019 年版ものづくり白書 (ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告), 経済産業省, 2019.
- [26] 稲葉 清右衛門 : 電気・油圧パルスモータを主体とする連続切削数値制御系の研究, 計測と制御, Vol.5, No.3(1966), pp.161-173.
- [27] 稲葉清右衛門 : 黄色いロボット, 日本工業新聞社, 1991, ISBN4-8191-0610-4.
- [28] FANUC museum collection, FANUC Corporation.
- [29] Catalog of FANUC Series 30i-Model B, FANUC Corporation, 2015.
- [30] 岸甫 : 数値制御用言語, 情報処理, Vol.22, No.6 (1981-06), 574-578.
- [31] 白瀬敬一 : 変種変量生産に求められる CAM 技術, 計測と制御, Vol.46, No.7 (2007-7), pp.505-51.
- [32] 井上久仁子他 : 加工用ソフトウェア, 精密機械, Vol.47, No.11 (1981-11), pp.45-51.
- [33] FANUC museum collection, FANUC Corporation.
- [34] 野澤量一郎, 岸甫 : NC プログラミング入門, 日刊工業新聞社, 1985, ISBN4-526-01315-3.
- [35] Mattson, M., Learning, C. : CNC Programming: Principles and Applications, Delmar Pub, (2002), 2nd Revised(2009/3/16) ISBN-10: 1418060992, ISBN-13: 978-1418060992.
- [36] JIS B 6315-2 : 2003, 機械の数値制御—プログラムフォーマット及びアドレスワードの定義—第 2 部 : 準備機能 G 及び補助機能 M のコード.
- [37] JIS B 6315-1 : 2013, 産業オートメーションシステム及びその統合—機械の数値制御—プログラムフォーマット及び アドレスワードの定義—第 1 部 : 位置決め, 直進 運動及び輪郭制御システム用データフォーマット.
- [38] FANUC NEWS 2019-III, FANUC Corporation, 2019.
- [39] 田中文基 : スマートな機械加工を支援する国際規格開発の動向, システム/制御/情報, Vol.63, No.5 (2019), pp.182-187.

- [40] JIS B 6316-1 : 2006, 産業オートメーションシステム及びその統合一機械及び装置の制御—CNC 装置のためのデータモデル—第 1 部：概要及び基本原理.
- [41] 標準化教育プログラム開発教材, 日本規格協会, 2009, [https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md\\_2550.pdf](https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md_2550.pdf), (accessed on September 6, 2018).
- [42] 坂本千秋：平成 19 年度基準認証研究開発事業（標準化に関する研修・教育プログラムの開発）第 5 章設計生産情報モデルの標準化, 経済産業省委託事業, (2009)20.
- [43] 竹内芳美：多軸・複合加工用 CAM, 日刊工業新聞社, (2013)9, ISBN978-4-526-07037-2.
- [44] 吉川弘之：CAD/CAM の問題点, 精密機械, Vol.47, No.11 (1981-11), pp.1-4.
- [45] 稲葉善治：ファナックの超精密加工機ロボナノの最新機種について, 精密加工研究会第 100 回記念例会テキスト, 2018.
- [46] 松尾豊：人工知能は人間を超えるか, KADOKAWA/中経出版, (2015)51-52, ISBN-10: 4040800206, ISBN-13: 978-4040800202
- [47] 2018 年版ものづくり白書（ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告）, 経済産業省, 2018.
- [48] 荒井栄司, 赤坂秀和, 若松栄史, 白瀬敬一：CAD における設計意図モデルと修正設計への適用, 日本機械学会誌, Vol.64, No.627 (1998-11), pp.384.
- [49] 梅田靖, 富山哲男, 吉川弘之：機能設計支援のための FBS モデリングの提案, 精密工学会誌, Vol.63, No.6 (1997), pp.795.
- [50] Yamazaki et al.: Autonomously Proficient CNC Controller for High-Performance Machine Tools Based on an Open Architecture Concept, Annals of the CIRP, Vol.46-1 (1997) 275.
- [51] 長野竜也, 白瀬敬一, 若松栄史, 荒井栄司：事例ベース推論に基づく切削条件試論システム, 精密工学会誌, Vol.67, No.9 (2001), pp.1485.
- [52] 仁戸田健吾, 青山英樹：エンドミル加工に関する加工手順・加工条件・加工ノウハウの自動データベース化技術の開発, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2006) 251.
- [53] Fukuda, R. et al. : Automatic Database Construction and Utilization Method of Machining Know-How, Proceedings of 2018 Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE2018).
- [54] 椎木祐策, Mohammad, I., 佐藤隆太, 白瀬敬一：加工事例を再利用して NC プログラムを作成する機械加工用作業設計システム, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.832 (2015), 15-00280.
- [55] ISO 14649-10, -11: 2004, Data model for computerized numerical controllers - Part 10: General process data, Part 11: Process Data for Milling.

- [56] Sudo, M. and Aoyama, H. : Basic development of data sharing CNC system (Case study on high accuracy machining of characteristic lines), *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.14, No.1 ( 2020 ) ,1.
- [57] ISO/IEC11578 : 1996, Information technology - Open Systems Interconnection - Remote Procedure Call (RPC).
- [58] Dwijayanti, K. and Aoyama, H. : Basic study on process planning for turning-milling center based on machining feature recognition, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, Vol.8, No. 4(2014), JAMDSM0058.
- [59] Dwijayanti, K. and Aoyama, H. : Development of Automatic Process Planning for Turning –Milling center with 2 Turrets System, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.81, No.5 (2015), pp.471-480.
- [60] Kiyooka, R., Dwijayanti, K. and Aoyama, H. : Development of Automatic System on Process Planning and NC program Generation for Turning –Milling Machine Tool with Multi Turrets, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.31, No.9 (2017), pp.878-882. (in Japanese).
- [61] 阿部 真美子, 梅木 秀雄, 中山 康子 : 設計開発業務におけるコミュニケーション情報を活用した知識共有, *経営情報学会 2004 年度秋季全国研究発表大会*, (2004)156-159.
- [62] 中山 庸子 : 設計開発における知識継承, *Information Processing Society of Japan Journal*, Vol.47, No.6(2006), pp.647-653.
- [63] Mitsui, M. : An Open Architecture CNC CAD-CAM Machining System with Data-Based Sharing and Mutual Information Feedback, *Annals of the CIRP* Vol.46(1997), pp.269-274.
- [64] Kimura, F., Ariyoshi, H., Ishikawa, H., Naruko, Y., Yamato, H. : Capturing Expert Knowledge for Supporting Design and Manufacturing of Injection Molds, *Annals of the CIRP*, Vol.53, No.1(2004), pp.147-150.
- [65] 成子 由則 : モノづくりに関する知識・ノウハウの伝承, *情報管理*, Vol.49, No.8(2006), pp.439-448.
- [66] 中山 亨, 鳥居 元, 網井 義浩, 平井 泰史 : 高能率フェイスミル加工技術の開発, 第15回品質工学研究発表大会論文集, (2007), pp.70-73.
- [67] 神蔵 一義, 大工原 徹, 渡邊 泰行 : セミドライによる高速深穴加工条件の最適化, 第11回品質工学研究発表大会論文集, (2003), pp.308-31.1
- [68] Higashi, M., Kohzen, I., Nagasaka, J. : An interactive cad system for construction of shapes with high-quality surface, *IFIP'83*, North-Holland , (1983)371.
- [69] Oya, T., Kimura, F. and Aoyama, H. : Style design system based on Class A Bézier curves for high-quality aesthetic shapes, *Proceeding of the ASME IDETC/CIE 2012*, 2, A, (2012), pp.627.



- [70] Mazda Motor Corporation Official Home Page, from <https://www.mazda.co.jp/>, (accessed on May 24, 2019).
- [71] 木村 文彦, 大家 哲朗, 青山 英樹: 意匠デザインにおける高品質形状のための曲率単調曲線生成手法, 精密工学会誌, Vol.80, No.6(20014), pp. 598-603.
- [72] Jeon, J. W. : A Generalized Approach for the Acceleration and Deceleration of CNC Machine Tools, Proceeding of the IEEE 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol.2 (1996), pp.1283.
- [73] Shih, Y. T., Chen, C. S., Lee, A. C. : Path Planning for CNC Contouring around a Corner, JSME international journal, Series C, Mechanical systems, machine elements and manufacturing, Vol.47, No.1(2004), pp.412-420.
- [74] Yamazaki, T., Seto, M., and Tsutsumi, M. : Design of Acceleration and Deceleration Commands for NC Machine Tools, Journal of the Japan Society for precision Engineering, Vol.66, No.8 (2000), p.1260-1264. (in Japanese).
- [75] 白瀬 敬一, 近藤 貴茂, 岡本 満, 若松 栄史, 荒井 栄司: NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想倣い加工システムの開発 (自律型 NC 工作機械のための実時間工具経路生成)日本機械学会論文集. C編 00066(00644), (2000-04-25)368-1373.
- [76] Shirase. K, Nakamoto. K, Aria. E, Moriwaki. T, Autonomous Machine Tool to Realize Flexible Machining Operation Unconstrained by NC program : Direct Machining Operation Controlled by Flexible Process and Operation Planning System Journal of the Japan Society for Precision Engineering Contributed Papers, Vol.70, No.11 (2004), pp.1449-1454.

## 関連論文

### 1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- (1) M. Sudo, H. Aoyama : “Basic development of data sharing CNC system (Case study on high accuracy machining of characteristic lines)”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.14, No.1, pp.JAMDMS0003, ( 2020) .
- (2) M. Sudo, H. Aoyama : “Basic Study on Development of Integrated CNC system-Productivity Improvement by Feedback mechanism of machining technology information-“, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, [Accepted]

### 2. 国際会議論文（査読付の full-length papers）

- (1) M. Sudo, T. Mizuno, H. Aoyama : “Basic Study on Development of Innovative CNC or Improving Machining Quality Based on Data Sharing” , Proceedings of The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 4 pages, (2017).
- (2) M. Sudo, H. Aoyama : “Productivity Improvement of Smart Factory by Innovative IoT Platform” , Proceedings of The 17th International Conference on Precision Engineering, 5 pages, (2018).