

Title	工作機械の自律化・知能化を目的としたヴァーチャルマシニングシミュレータの開発
Author(s)	成田, 浩久
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1534
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

工作機械の自律化・知能化を目的とした
ヴァーチャルマシニングシミュレータの開発

平成13年12月

成 田 浩 久

<論文目次>

1 緒論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	2
1. 3 本論文の構成	4
2 自律型・知能型工作機械 (AIMac)	7
2. 1 求められる機能	7
2. 2 システムの概念構造と構成	9
2. 3 システムの各機能	12
2. 3. 1 Management ブロック	12
2. 3. 2 Prediction ブロック	16
2. 3. 3 Observation ブロック	18
2. 3. 4 Strategy ブロック	20
2. 4 ブロック間の情報の流れ	22
2. 5 まとめ	28
3 ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)	29
3. 1 ヴァーチャルマニュファクチュアリングの定義	29
3. 2 VMSim のシステム構成	30
3. 3 形状シミュレータ	32
3. 3. 1 集合演算	32
3. 3. 2 工具除去体積の生成	33
3. 3. 3 切り込みと金属除去率の算出	39
3. 4 物理シミュレータ	41
3. 4. 1 切削加工モデルの分類	41
3. 4. 2 瞬間切削力モデル	42
3. 4. 3 工具の変形モデル	46
3. 4. 4 工具ホルダの変形モデル	47
3. 4. 5 工具および工具ホルダの変形と加工誤差	50
3. 4. 6 切削係数の導出	51

3. 4. 7	切削モデルの検証.....	54
3. 5	VMSim による切削条件の修正.....	58
3. 5. 1	NC プログラムシミュレータ	58
3. 5. 2	切削係数導出実験.....	63
3. 5. 3	VMSim による加工工程の評価と修正.....	66
3. 5. 4	実加工実験による検証.....	75
3. 6	まとめ.....	80
4	実時間工具経路生成 (IP_TPG)	81
4. 1	工具経路生成アルゴリズム.....	81
4. 2	工具経路の修正.....	85
4. 3	加工順序情報との統合.....	88
4. 4	まとめ.....	89
5	AIMac システムによる自律加工.....	91
5. 1	統合システムの構成.....	91
5. 2	実験装置.....	93
5. 3	予測情報に基づく自律加工.....	94
5. 4	まとめ.....	97
6	結論と展望	99
6. 1	結論.....	99
6. 2	展望.....	100
	参考文献	101
	研究業績	108
	謝辞	109

1. 緒論

1. 1 研究の背景

生産技術は、エレクトロニクス技術、制御技術、コンピュータ利用技術の発達に伴い、高品質な製品を低コストで短期間に作り出すために、高能率、高精度加工を目指して進化しつづけている。特にコンピュータ利用技術の発達は、企業における CIM や CAD/CAM/CAE の導入を促進させ、製造活動の情報化が実現されている。図 1.1.1 は、現在の設計から加工までの流れを示している。図を見れば分かるように、この過程の中でも情報化が進み、設計仕様を基に CAD で設計された加工部品の形状と技術者が設定した切削条件から CAM を用いて NC プログラムを作成し、それに基づいて工作機械で加工を行っている。最近ではフィーチャーベース CAM のように、形状モデルにフィーチャー情報を付加し、加工順序の決定や工具選定が自動的に行えるようなものもある。このような製造活動の情報化は、加工の高能率化に大いに寄与しており、今後も生産活動を革新していくことは疑いようがないほどである。

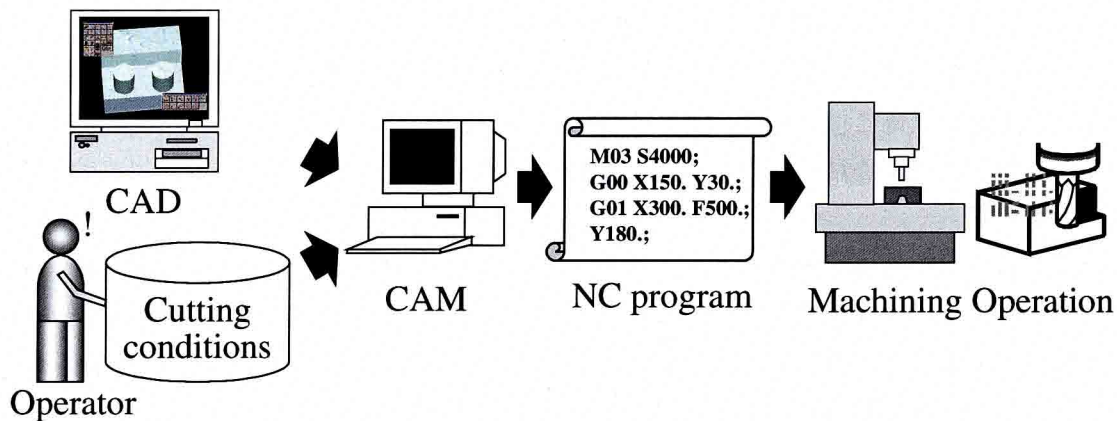


Fig.1.1.1 Current Manufacturing Flow from Design to Machining Operation

しかし近年、熟練技術者の高齢化や定年退職、さらには若者の製造業離れやスキルの伝承の障害によるスキルの空洞化といったことが問題視されはじめている[1-1]。これは言い換えれば、近い将来、新規に導入した工作機械を用いる場合やこれまでと全く違った製品を加工する場合に、切削条件の設定や切削方法、工具選択が適切にできないといったことを意味している。これまで日本の製造業の加工技術が高い水準を保ってきたのは、現場の熟練技術者のスキルによるところが非常に大きいことは否定できない。今後市場からは、さらなる品質向上、コスト低減、短納期要請といったものが求められると予想されるが、このような事態に対応するためには、工作機械や工具の性能を十分に活用すると共に製品に対する要求を満たすような代替技術が必要になると考えられる。さらに実際の加工では様々な物理現象が発生するのは避けられず、これらに

1. 緒論

よって引き起こされる影響を機械のオペレータのレベルに依存せずに制御することも必要となってくる。

また最近では多様化する市場の要求に対応できる変種変量生産を実現するために、また従来の生産システムの問題点（信頼性・対故障性、柔軟性）を解決する次世代の生産システムとして自律分散生産システムが提案され研究されている[1-2]。そのような次世代生産システムでは、高度に自律化された各構成要素（工作機械）が自ら考え、互いに協調してプランニングから加工までを行うものとしており、それらを実現するための新しいコントローラも必要であると考えられる。

1. 2 研究の目的

本研究では、上述の問題を解決できるような自律型・知能型工作機械（AIMac: Autonomous and Intelligent Machine Tool）の提案を行い、システムの試作を行う。AIMac は先に述べたように、技術者の知識や経験によらず工程・作業設計をすると共に、切削条件や工具経路を最適化して加工を行えなければならない。そのためにコントローラは、知識修得、状態認識、状態予知、方針決定といった機能が必要であると考えられる。これら4つの機能は、実際に加工を行うために技術者が有していると予想されるものである。すなわち知識修得とは、加工に必要なすべての情報を蓄積していく能力のことで、蓄積された情報は加工を行う前のあらゆる決定には欠かせないものである。また状態把握とは、機械や工具の状態、加工中に起こっている現象を正しく把握する能力のことであり、状態予知とは、実際に加工が行われる前に加工現象を予知する能力のことであり、方針決定とは得られるすべての情報から各段階において最適な方法を決定する能力のことであり、本研究で提案される AIMac は、これらインテリジェント機能を有し、自律的な加工を実現するものである。

幸いなことに、工作機械メーカーやエンドユーザーによる機能の特化や追加を容易に実現するために、近年提案された技術であるオープンアーキテクチャ CNC（Computer Numerical Control）は、上述の機能を実現するのに適している。また CNC 工作機械の性能は、工作機械メカニズムと CNC コントローラの両方の性能に依存しているが、頻繁に起こる CPU の性能向上により、コントローラの性能向上の方がメカニズムの性能向上よりも早いため、現在の工作機械システムの性能を、コントローラを置き換えるだけで向上させることも可能であると考えられる。標準化の方法や信頼性、実際の CNC システムへの実装方法など解決すべき問題はありますが、将来の工作機械に必要な技術であることは間違いない。そこで本研究では、このオープンアーキテクチャ CNC コントローラを活用していると仮定して話を展開していく。

これまでに工作機械の自律化・知能化に関する研究は、本研究と同様にオープンアーキテクチャ CNC コントローラを活用していると仮定して、幾つか行われてきている。カリフォルニア大学デービス校の山崎教授は、TRUE-CNC、VIVID-CNC と呼ばれる高性能工作機械用インフラストラクチャの提案を行い開発を進めている[1-3,1-4]。このシステムは、自律的に日々の加工ノウハウを蓄積していき、オペレータの技術や経験によらずに、与えられた環境で可能な限りの高い生産性及び品質を達成することが可能である。東京大学の光石教授らは、加工条件をオンライン

で変化させる適応制御や、加工条件と加工経過との関係をデータベースとして蓄積するシステムを開発した[1-5,1-6]。また京都大学の垣野教授らは、通常の数値制御ループの外側に、加工状態監視と制御を行うループと加工結果をデータベースに反映させるループを持った知能化工作機械の開発を行っており、現時点においてはドリル加工を対象に研究が進められている[1-7,1-8]。ブリティッシュコロンビア大学の Altintas 教授は、HOAM-CNC (Hierarchical Open Architecture Multi-processor CNC) と呼ばれるシステムの開発を行っており、切削力適応制御や工具欠損と摩耗の検出がインテリジェントな加工の例として紹介されている[1-9]。

他に、ゼネラルモータース、フォード、クライスラーの 3 社による提案から始まった OMAC (Open Modular Architecture Controller) プロジェクト[1-10]や EC の Esprit (European Strategic Program for Research and Development in Information Technology) プロジェクトの OSACA (Open System Architecture for Controls within Automation Systems) [1-11, 1-12]は、ユーザーによる機能追加が可能なオープンシステムの標準仕様を提供している。特に、ゼネラルモータース社のパワートレイングループ (GMPTG) は、OMAC に基づいて”Math-Based Manufacturing”を実施している[1-13]。これは製品設計、鋳造設計、加工設計の 3 次元数学モデルをリンクするシステムで、製品設計の変更から自動的に鋳造・加工設計の変更が実現されるものである。また日本において行われた OSEC (Open System Environment for Controllers) プロジェクトでは、OSEL (Open System Environment Language) と呼ばれるオブジェクト指向言語を用いて、CAD/CAM から工作機械の各構成要素まで、指令データを伝達することができるプロトタイプの開発が試みられている[1-14]。

さらに近年、STEP-NC (Standard for Exchange of Product Model Data for NC programming) といった CAD/CAM や NC コントローラ間の相互の情報伝達をサポートする新たな NC プログラミングインターフェイスが現れている。これにより高度な情報の授受が CAD/CAM と NC コントローラ間で可能になるので、今後の工作機械の知能化に大いに貢献するものと期待されており[1-15]、研究成果が待たれる。

本研究では、現状の加工や今までに行われてきた研究事例を分析した結果、工作機械の自律化・知能化が思うように進まない原因を以下のように考えた。

1. 現状の NC プログラムのように、加工指令を事前に全て決定して加工を行っているため、加工状況に柔軟に対応できる仕組みになっていない。
2. 加工中に発生する各物理現象の予測情報が活用されていない。(仮想生産に代表されるコンピュータシミュレーション技術の利用が不十分である。)

予め NC プログラムのように加工指令を作成して実行する方式は、工具経路や切削条件を加工途中に柔軟に変更できないので、フィードバック情報を活用することができない。これは、いったん加工を始めてしまうと加工状況を考慮して切削条件を修正したり、加工中に加工トラブルが発生した場合には回避できないといったことを意味している。また STEP-NC でも指摘されているように、現状の NC プログラムでは、製品形状や精度、被削材の種類、工具に関する詳しい情

1. 緒論

報を CAD/CAM から NC コントローラに送ることができない。すなわち、知能化を実現するために必要となる十分な情報が NC コントローラに伝わっていないので、工作機械自身がある場で柔軟に対応できないと考えている。

また予測情報は、工程設計や作業設計、切削条件や工具経路の決定、加工工程の診断にも利用できる極めて重要な情報である。現在のコンピュータ支援システムには、被削性を評価する機能がないので、試し削り等を行っているが、一品生産などには現実的とは言えない。

そこで本研究では、AIMac システムを 1 の問題を解決し加工状況に柔軟に対応できるような構成として提案して、その試作を行っていく。特にマシニングセンタによるエンドミル加工を対象に開発を進める。また 2 に示したように予測情報を活用するために、AIMac を実現する上で必要不可欠な技術である加工予測シミュレータの開発を行い、自律加工の可能性を模索する。

1. 3 本論文の構成

本論文は、6 章から成り立っており、構成は図 1.3.1 のようになっている。

1 章では、本研究の背景と目的について示す。

2 章では、次世代の工作機械に求められる機能を明らかにした後に、AIMac の概念アーキテクチャとシステムデザインを示す。またシステムを構成する 4 つのブロック (Management, Prediction, Observation, Strategy) の説明と共に、それぞれが果たすべき役割を明らかにする。

3 章では、工作機械の知能化を実現するために開発したヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim) を紹介する。まずシステム構造について示し、構成要素である形状シミュレータと物理シミュレータについて述べていく。また VMSim を利用した切削条件の最適化について説明する。

4 章では、加工と並行して指令を生成するために荒加工用の等高線と走査線の工具経路をインプロセスで生成・修正できるアルゴリズムの提案を行い、インプロセス工具経路システム (IP_TPG) について説明し、システムの検証を行う。

5 章では、VMSim とインプロセス工具経路生成アルゴリズムを統合したシステムの紹介をした後に、実際に加工を行って、統合システムによる自律加工を試みる。

6 章では、本研究で得られた結論と将来の展望について示す。

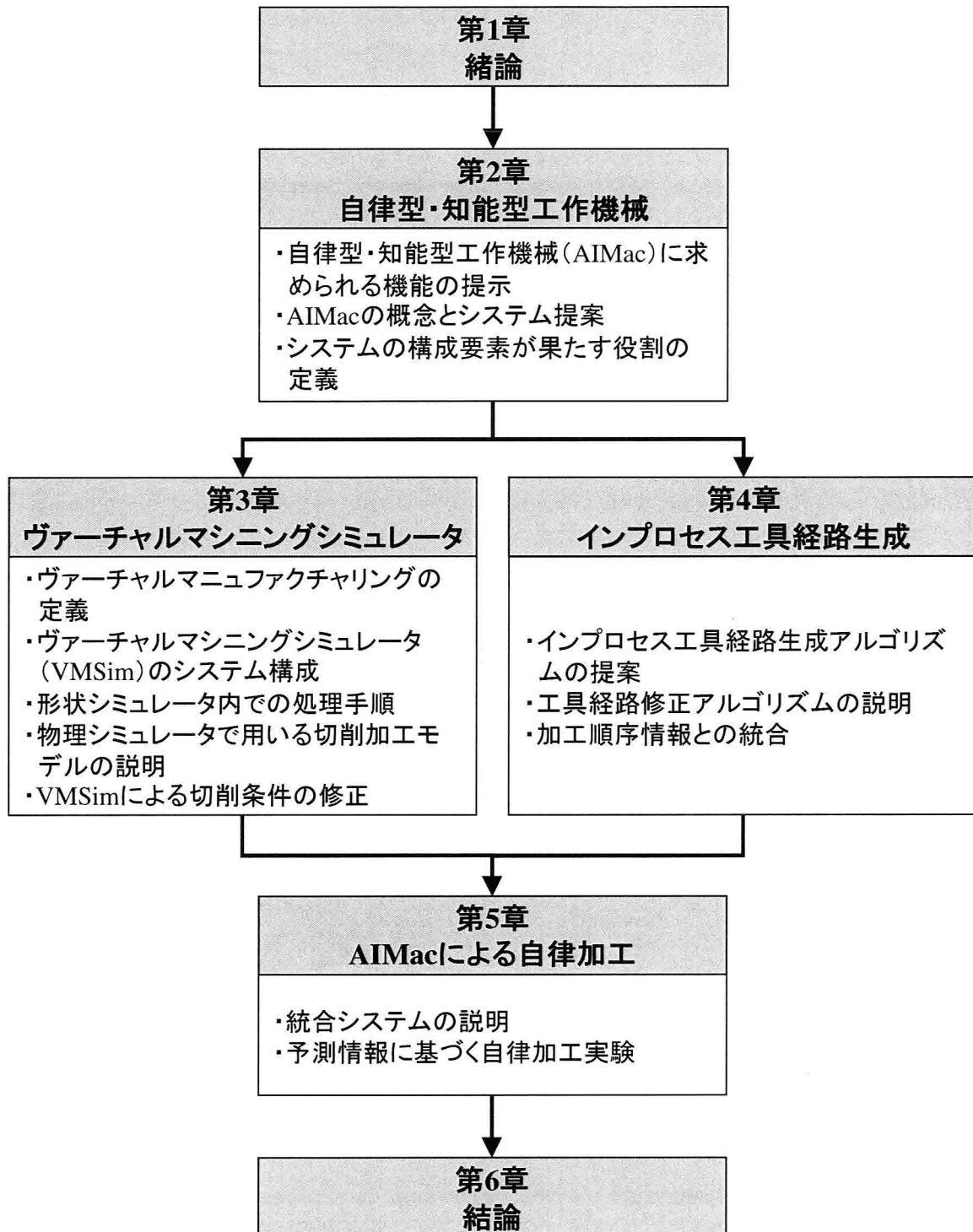


Fig.1.3.1 The flowchart of this study

1. 緒論

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2.1 求められる機能

次世代の工作機械 AIMac の提案を行うために、先に示した求められる機能である知識修得、状態把握、状態予知、方針決定をもう少し具体化しておく。

柔軟な工程・作業設計

これまでの生産システムでは効率的な生産を達成するために集中的な管理が行われ、工程・作業設計の決定はオペレータによって行われている。しかし近年の多様化する製品に対する要求は、生産形態を多品種少量生産や変種変量生産へと変化させており、製造工程の変更や設備の故障といった事柄にシステム全体に悪い影響を与えることなく柔軟に対応するためには、自律分散生産システムのようにショップフロア内の工作機械自身がそれぞれ考えて、工程・作業設計を行うべきである。そのためには各工作機械は、工具や工作機械自身のデータの他に、工具や被削材に応じた切削条件データを有し、それらのデータを活用し、他の工作機械と協調して工程・作業設計が行える機能が必要である。

切削条件の最適化

現在は CAD で設計された加工部品の形状から CAM を用いて加工指令である NC プログラムを作成して加工を行っている。またフィーチャベース CAM のように、加工モデルにフィーチャ情報を付加し加工順序の決定や工具選定を自動的に行えるようなものもある。しかしながら切削条件の決定は、未だにオペレータの知識や経験に依存して決定されているので常に最適である保証はない。また現在の NC プログラムによる加工の場合、同じブロック内でも切削条件が異なる場合があるので、最適な加工方法の設定をしているわけではない。無人運転をしている場合を除いて、現場では機械のオペレータが勘に基づいてオーバーライド値を変更して対応しているのが現状である。そこで工作機械自身が加工状態の予測や計測を行い、それに基づいて適切な切削条件を設定しながら加工をしていくべきである。これは、作業者が加工をするにあたり加工状態を予測して加工を行い、実際の状態を基に修正を行って加工を続けることに相当する。そのためにコンピュータ上に実世界と同等な仮想空間を作りだし、加工を行う前に加工状態の予測を行ったり、実加工の情報を効率的に取得して計測する機能が必要である。

加工トラブルの回避

加工中にびびり振動や工具欠損などの異常が発生した場合には、すぐに検出し回避しなければ工作物や工具、工作機械にダメージを与えるだけでなく、危険を伴う場合がある。現在のように加工指令である NC プログラムを予めすべて設定する形式では、加工中の異常回避を自動的に行うことができない。従って、そのような状況に対しては機械のオペレータが、現場でオーバーラ

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

イド値を調整したり、緊急停止ボタンを押したりして対応している。また本研究のように自律的な加工をするためには、回避の後に問題のない工具経路や切削条件を決定する機能が必要である。

このような考えに基づいて設定した知的機能を表 2.1.1 に示す。表に示すように各知的機能をプリプロセス、インプロセス、ポストプロセスという3つの段階で分類した。プリプロセスでは、加工を行う前の準備が行われる。すなわち使用する工作機械や加工順序の決定が行われたり、必要な加工技術情報の提供が行われる。インプロセスでは、加工状況に合わせた加工工程の最適化が行われる。すなわち実時間で加工状況を予測したり、実際の加工状況を把握して切削条件を適切なものにする。そしてポストプロセスでは、最新の加工技術情報の収集が行われる。すなわち工作機械に付属のデータベースの更新が行われ、他の工作機械との情報の共有が行われる。

提案する AIMac は表 2.1.1 に示した機能を実現できるものでなければならない。

Table 2.1.1 Required intelligent functions of AIMac

Pre-Process	Flexible process planning
	Decision of operation sequence
	Provision of resource and machining know-how data
In-Process	Prediction of machining process
	Maintenance for precise prediction
	Machining process recognition
	Machining trouble detection
	Autonomous decision of cutting conditions and tool path
	Intelligent control for machining trouble avoidance
Post-Process	Generation and maintenance of database

2. 2 システムの概念構造と構成

図 2.2.1 は AIMac の概念構造を示している。図を見れば分かるように、Management, Prediction, Observation, Strategy という 4 つのブロックから成り立っている。

Management では、ショップフロア内における工作機械毎の柔軟な仕事の分担やスケジューリング、そして工作機械自身のデータや工具・被削材データ、過去の加工事例など、工作機械を有効に活用するための情報提供を行う。

Prediction ブロックでは、物理モデルを用いて実時間で加工状況や加工トラブルを予測する。「実時間」とは、実際の加工より少し早いということである。この予測結果は、加工中の切削条件の最適化、びびり振動や過度の切削力といった加工トラブルの回避といったことを実現するために使われる。

Observation ブロックでは、実加工中に各センサーからの信号を基に加工状況を把握すると共に、加工トラブルの検出を行う。検出された信号のフィードバックは、インテリジェントな加工を実現するために必要である。

Strategy ブロックでは、Management, Prediction, Observation からの情報を基に実際に加工を行うための戦略を立てる。戦略としては切削条件（送り速度、主軸回転数、切込み）と工具経路の決定を行う。特に Prediction と Observation からの情報を基に、動的に切削条件や工具経路を適切なものにして加工を行う。

ところで、図 2.2.1 を一般的な視点から見ると、これら 4 つの機能ブロックは、技術者の経験や技能、勘といった感覚的な判断に基づく技術を表しているといえることができる。またこれらは、若者の製造業離れや熟練技術者の高齢化によって、新たな支援ソフトウェアの開発が必要とされる技術である。図中の矢印を見れば分かるように、これらの機能は完全に独立しているわけではなく、それぞれが相互に情報の授受を行って役割を果たしている。しかしながら現在のコンピュータ支援システムである CAM は、Strategy の一部を実現しているのみで、他の各ブロックの機能が未だに実現できていないことや、各ブロックからの情報の流れが活かされていないことを読み取ることができる。このように図 2.2.1 は加工に必要な機能を的確に表現し、その関係を明らかにしており、工作機械の情報化・知能化を進める上で非常に重要な一般的概念と成り得る。こういった意味からも AIMac の開発意義が伺える。

概念を基に提案した AIMac のシステム構成を図 2.2.2 に示す。図に示されているように、各ブロックはいくつかのモジュールから成り立ち、これらのモジュールの機能により自律的でインテリジェントな加工が実現される。すなわち AIMac のシステム構成は、工具経路や切削条件が予め全て決められて加工が行われる従来の NC 工作機械と大きく異なり、加工状況に柔軟に対応して加工を行う自律的機能と、加工の予測や診断、蓄積される加工データの利用による知的機能の枠組みが実現されているのが分かる。

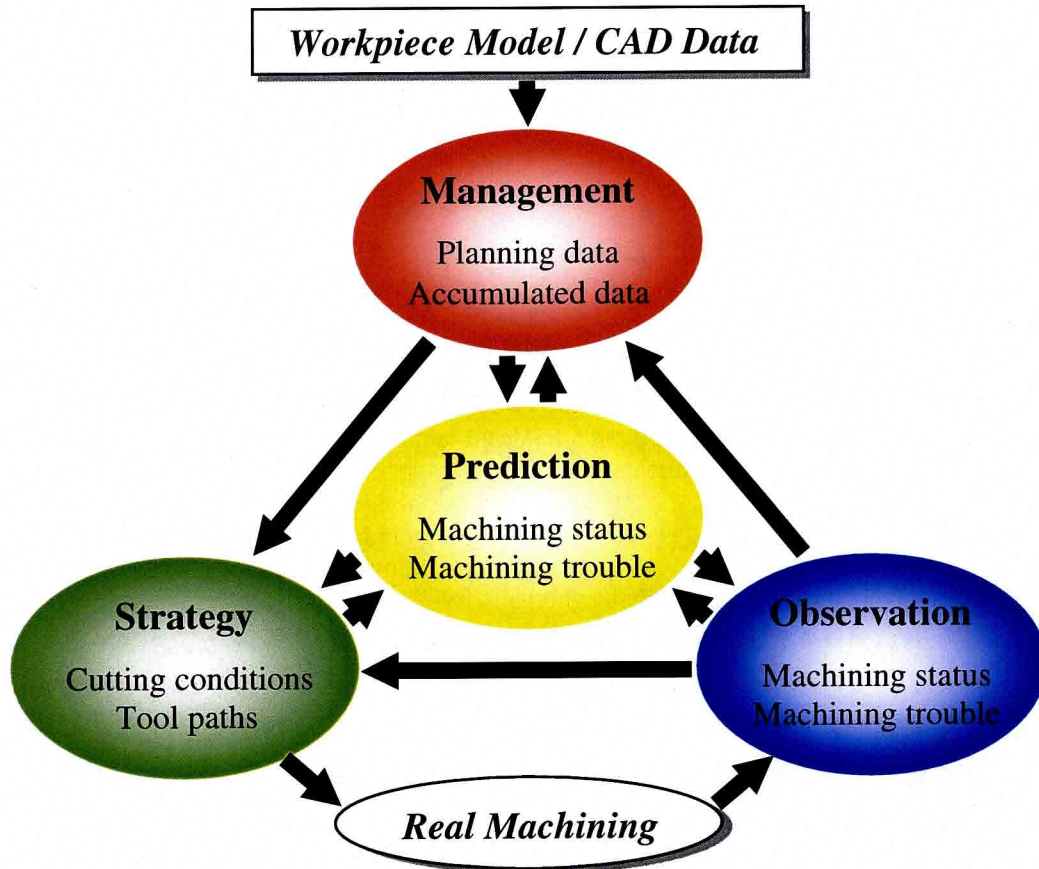


Fig.2.2.1 Conceptual Architecture of AIMac

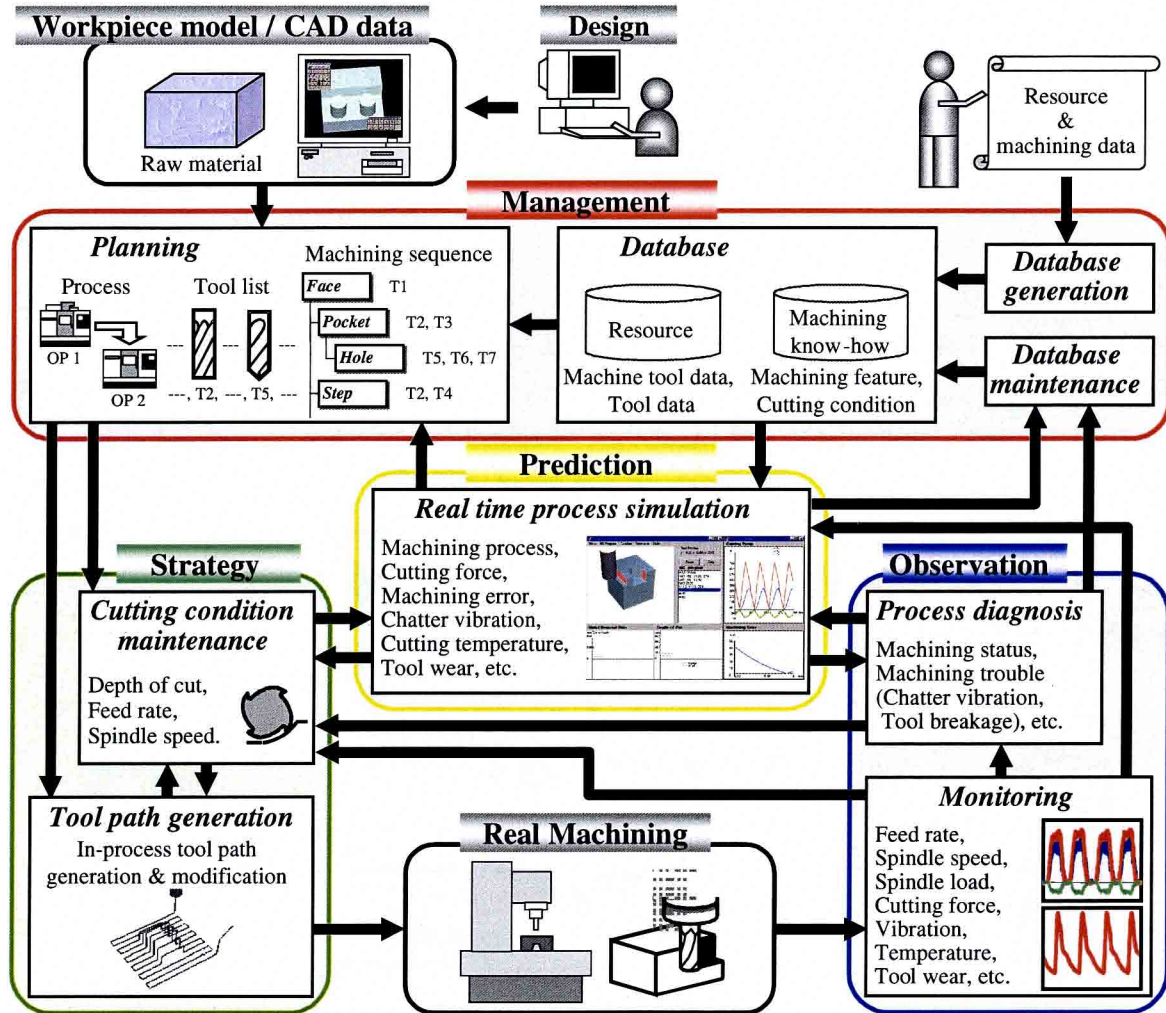


Fig.2.2.2 System Design of AIMac

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 3 システムの各機能

2. 3. 1 Management ブロック

Management ブロックは、図 2.2.1 から分かるように Planning モジュールと Database に関するモジュールから成り立っている。

Planning モジュール

近年の NC 工作機械の性能向上は目覚しく工作機械の性能を活用して高い生産性を達成するためには、加工前に使用する機械や工具、加工順序、切削条件を適切に決定することが非常に重要である。これまで多くの研究が行われているのを見れば分かるように[2-1, 2-2]、コンピュータシステムを用いて決定することは避けて通れない。AIMac への最初の入力は素材形状と最終形状の情報であるが、このモジュールはこれらの情報から、上述の決定を行う。図 2.3.1 は Planning モジュールの処理の流れを示している。図に示すように、大きく分けてフィーチャ認識、加工方法や順序の決定、工具選択、切削条件の決定、加工順序の決定という 5つの機能が必要である。

入力情報から加工領域と加工順序を決定するために、CAD で作成された製品モデルを加工フィーチャモデルへの変換を行う。製品モデルは、その形状データと表面粗さや公差などの品質データから成り立っているため、加工フィーチャの認識を行い、その情報を付加してその後の処理を続けていく。しかしながら加工方法の決定、工具の選択、切削条件や経路パターンなどの決定は、未だにオペレータの知識や経験を必要とする事柄である。そこで後述する加工ノウハウデータベースとリソースデータベースを用いて自動決定するようにする。

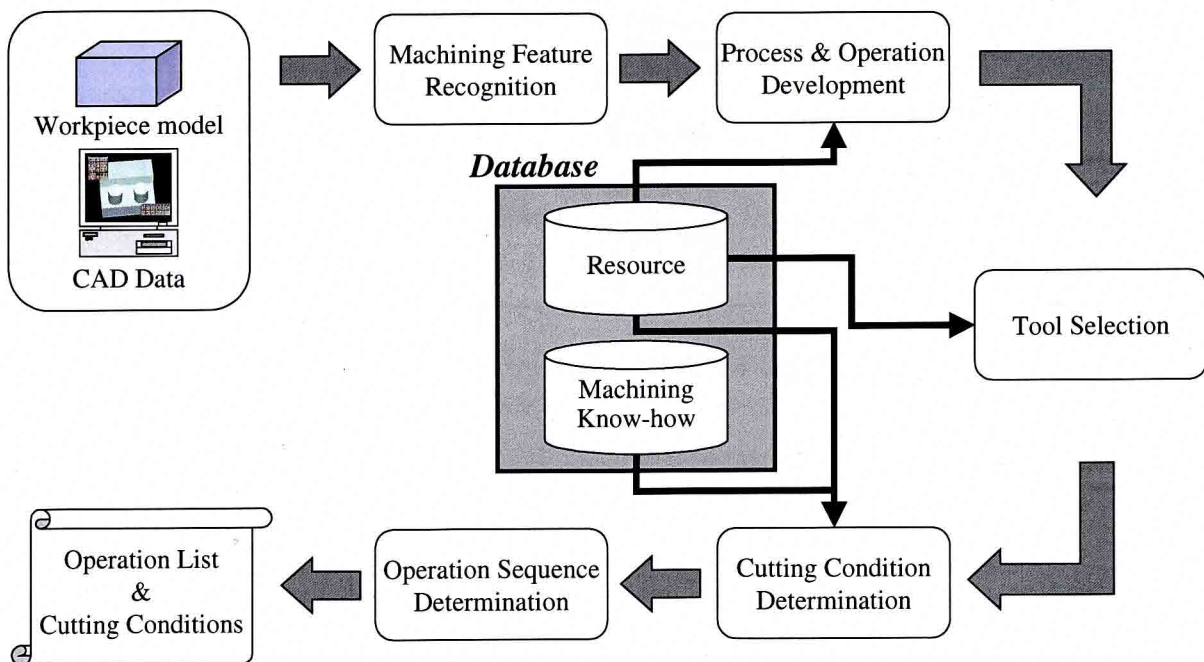


Fig 2.3.1 Planning Task Flow of AIMac

まず行われるのは CAD データから加工フィーチャの認識である。加工フィーチャとは加工部品の形状特徴の情報で、その認識は CAPP (Computer Aided Process Planning) の分野で最も重要な仕事の一つとされている。なぜならば、これらは自動的に工程を決定するのに適した非常に高度な情報だからである。そのため加工フィーチャの認識に関して数多くの研究が行われてきている[2-3, 2-4, 2-5]。加工フィーチャの分類には、製品形状モデルを主体としたものもあるが[2-6]、加工の観点から分類されるべきである。すなわち切削条件や加工方法の情報を付加して、ターニングフィーチャ、ドリリングフィーチャ、ミリングフィーチャの3つの種類を基に分類すべきである。本研究ではマシニングセンタを対象にしているので、特にドリリングフィーチャとミリングフィーチャについて話を進めていく。

加工フィーチャは、分類すると図 2.3.2 のようになる。図に示すような種類の情報を基に工具の進入方向や使用する工具の大まかな決定が可能である。例えば穴やポケットの場合は、上方からしか進入できない。一方、フェイスなどの外に開いた形状は横から進入可能である。工具の選択も穴やポケットの方がフェイスよりも制限される。

また加工方法や工具の決定のためには、加工フィーチャとともに他の付属情報が必要である。例えば穴加工の場合はタップや面取り、底の形状の情報が必要である。他の加工フィーチャに関しては、面取りの他にコーナ部の R 値や加工精度の情報が必要な場合もある。

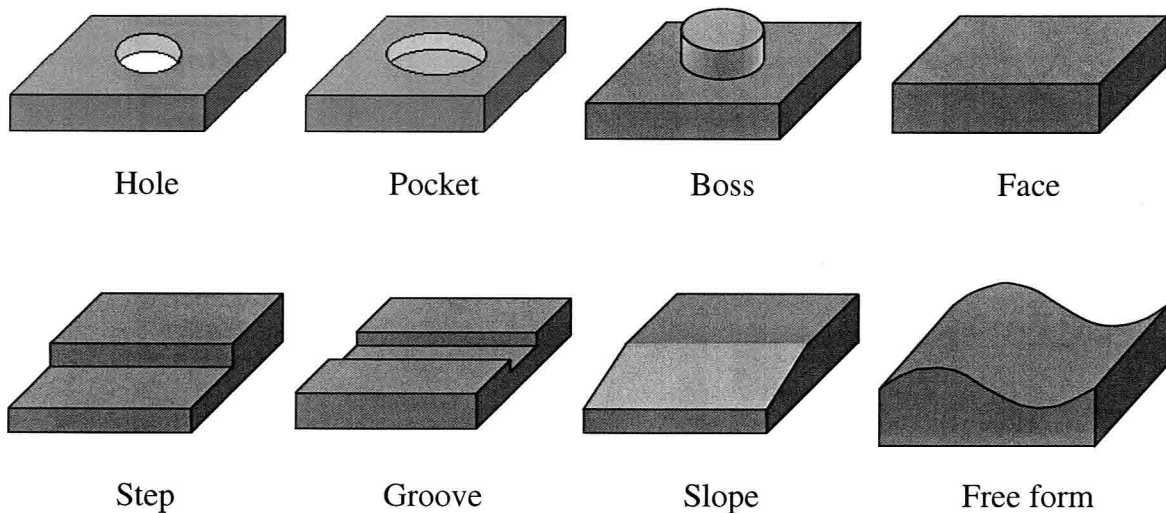


Fig.2.3.2 Typical Machining Feature

実際に製作される加工形状は図 2.3.2 に示した形状を組み合わせた複雑なものである。すなわち加工を行うという観点から見れば、それぞれの加工フィーチャはお互いに影響を与えることがあるので、それぞれを独立して取り扱うことができない。そこでフィーチャトポロジーという加工フィーチャ同士の関係を表す概念を用いる。例えば図 2.3.3 は、製品形状を図 2.3.2 で定義した加工フィーチャで分類し、それらのトポロジーを表現したものである。図に示されるように、この製品は 10 個の加工フィーチャから成り立っており、ポケットの中にボスが 2 つ、2 つのステ

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

トップ上にそれぞれ穴が2つある。トポロジー情報をみれば分かるように、ポケットと2つのステップはフェイスと、ボスはポケットと、穴はステップと密接な関係がある。また、ポケットとステップはそれぞれ独立した状態であり、ステップ上のそれぞれの穴も同様である。このトポロジー情報によりフィーチャ間の位置関係が分かり、どの加工フィーチャから先に加工していけばよいかを表現できるという利点がある。従って、加工順序を決定する際の重要な情報となる。

製品形状によっては、加工フィーチャの情報を与える際に、形状の分割の仕方によって効率が変わる可能性がある。そこで可能性があるすべての形状の分割パターンに対して、使用する工具と切削条件、加工順序を決定し、最終的には工具交換や加工時間が少なくなるような工程を採用するようにする。

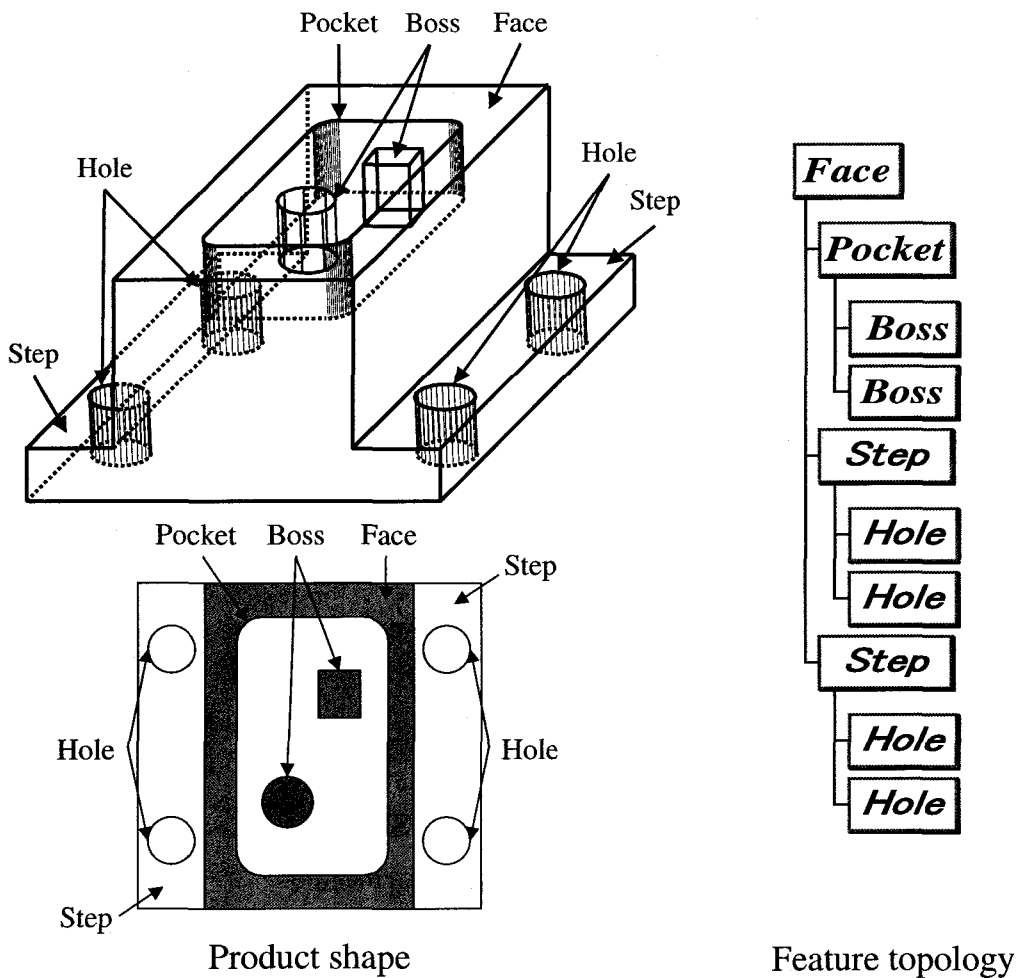


Fig.2.3.3 Machining Feature Topology

データベースに関するモジュール

AIMac のデータベースとして用意される情報は、リソース情報と加工ノウハウ情報である。リソースデータベースには、工作機械や工具、ジグや固定具などの情報が扱われている。すなわち、工作機械と工具マガジンに保持されている工具の種類やその仕様、剛性や加工工程を予測するための係数などが取り扱われている。また加工ノウハウデータベースには、過去に行われた加工事例が蓄積されている。蓄積されているデータは、切込みや送り速度、主軸回転数などの切削条件の他に、どのような加工形状（加工フィーチャ）を加工したかなどの情報である。

今までに、このようなデータベースを用いずに、使用する工具や切削条件を決定しようとする研究も行われているが[2-7]、実用的な結果を得ることができるとは考えられない。また、作業者が工程設計や作業設計をする場合は、過去に使用された切削条件を参照するだけでなく、必ず工場の設備が強く考慮されて行われると言われている[2-8]。そこで本研究では2種類のデータベースを用意することにした。

またデータベースには、最初に入力されたデータだけの固定的なものとして、工作機械メーカーや工具メーカー、技術者などから新しいデータが提供された場合は、新たにデータベースに蓄積していくようにする。さらに加工結果を基にリソースデータベースや加工ノウハウデータベースを更新していき、次の加工に反映させていくようにする。リソースデータの更新、特に工具のデータは、摩耗の影響を考慮するために、加工終了後にデータベースを更新することが重要である。また加工ノウハウデータは、Prediction ブロックや Observation ブロックで抽出された切削条件を、Observation ブロックで判定された加工結果を参考にしてデータベースに記録するようにする。具体的には、成功した切削条件事例については、そのデータを記録していくが、失敗した切削条件事例については、失敗した原因を解析して記録していく。さらに定期的に、長期間使用されていない切削条件の削除を行い、データベースを整備していくようにする。

これらのデータベースの更新は、人間で言えば学習や経験によって加工に関する情報を獲得していくことに相当し、知能化のためには、欠くことのできない機能の一つである。

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 3. 2 Prediction ブロック

Prediction ブロックは、実時間で加工工程を予測するモジュールから成り立っている。実時間とは、先に説明したように実際の加工より少し早いという意味である。

Real time process simulation モジュール

現在の設計から加工に至るまでの流れの中には、加工状態の予測を支援するツールは極めて少なく、しかも活用されているとはいえない。これもまた、オペレータの頭の中で行われているものの一つであり、コンピュータによる支援が望まれている領域でもある。

このモジュールは、素材形状と工具、その諸性質、切削条件を入力として、実際に加工中に起こる現象の予測を出力とするものである。加工工程の予測を行うために必要な機能は、大きく分けて形状予測と現象予測の2つである。

形状予測とは、工具と被削材の相対的な運動により、不要な部分を除去して、新しい形状を作り出す幾何学的な形状変化の過程を予測することを意味する。また幾何学的な関係から、実際の切込みや金属除去量を算出することも必要である。この形状予測をコンピュータ上で実現するには、近年よく用いられるコンピュータグラフィックス技術が非常に有効であると考えられる。現時点で Z-map や CSG (Constructive Solid Geometry), B-reps (境界表現法) など立体形状の定義の仕方や、それに応じた形状変化の計算の仕方など、様々な手法が提案されており[2-9, 2-10], どの手法が加工工程の形状予測に相応しいか断言することは難しいが、この技術が必要不可欠であることに間違いはない。

図 2.3.4 は、B-reps を用いて工具と被削材 (円柱と角柱) をモデリングし、工具の移動に伴う被削材形状の変化の様子を表示したものである。表示に関しては、OpenGL[2-11]というグラフィックライブラリを利用した。このような手法により、加工中の被削材の形状変化を把握すると共に、幾何学的な情報を取得することが可能となる。

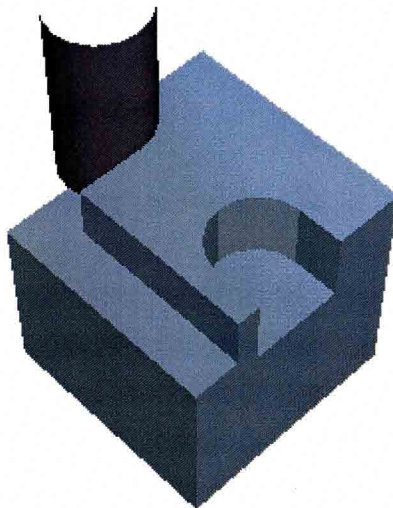


Fig.2.3.4 Output Example of Computer Graphics

現象予測とは、工具が被削材を加工する際に発生する物理現象を予測することである。物理現象を予測するためには、加工プロセスを対象にして確立された理論に基づき行われるべきである。そうすれば加工状況に適した切削条件を決定するための指針を提供することができる。本来、このような切削理論は、切削実験によって求められたデータを用いるべきではない。しかし、これまで数多くの研究が行われてきたが、未だにそのような理論を確立するには至っていない[2-12]。例えば、図 2.3.5 に示すような 2 次元切削理論は、現在よく使用される切削理論の一つであるが、これも「完全な」理論で成り立っているわけではない。

そこで本研究でも、これまで提案されてきた理論と同じように、実測データを用いる理論を基に現象の予測を行う。また、加工中の切削力のデータから予測に必要な係数の値を逐次更新して予測精度を維持させるようにする。本研究で用いる理論の詳しい説明は 3. 4 節で行う。

予測される項目としては、切削力、加工誤差、びびり振動、切削温度、工具摩耗、表面粗さなどが挙げられる。なぜならば、これらは工作機械や工具の能力、加工精度、加工トラブルの発生に深い関係があるからである。現在の CAM には、このような項目を予測する機能が存在ないので、オペレータの能力が、加工の良し悪しに大きな影響を与えてしまう。

このような予測機能は、事前評価だけでなく、加工工程の診断や加工事例の収集にも利用でき、工作機械を智能化するためには極めて重要である。

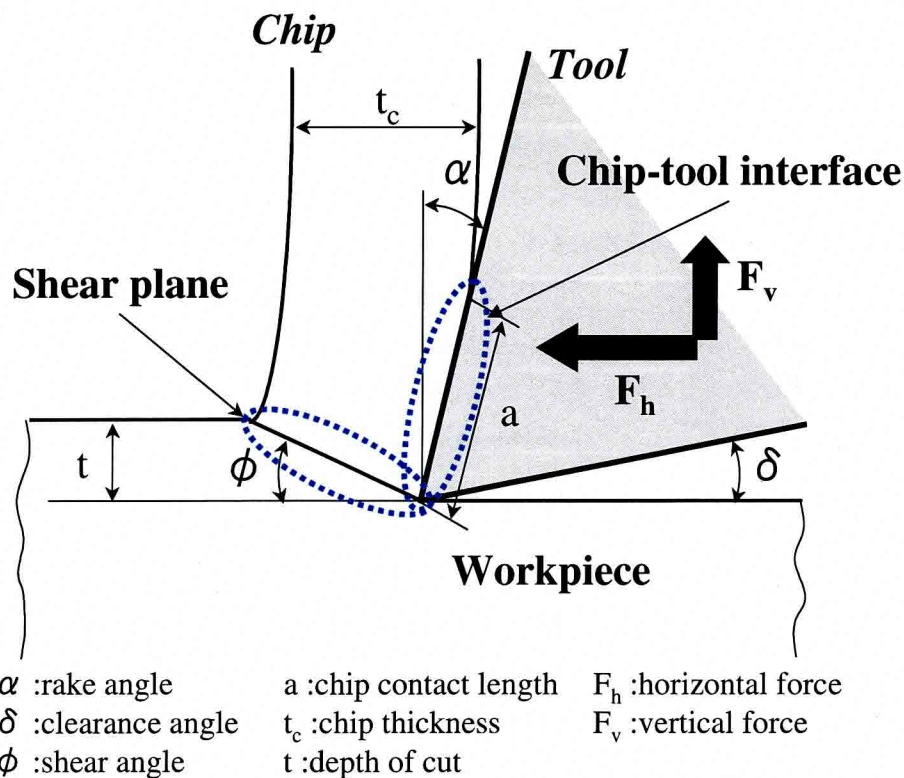


Fig.2.3.5 Orthogonal Cutting Theory

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 3. 3 Observation ブロック

Observation ブロックは、図 2.2.1 から分かるように Monitoring モジュールと Process Diagnosis モジュールから成り立っている。

Monitoring モジュール

このモジュールは、各種センサを用いて得られる信号から加工工程の把握を行う。測定される項目は、大きく分けてパラメータ情報と物理現象である。指令パラメータ情報とは、送り速度や加速度、主軸回転数などで、工作機械の状態の把握に必要な情報である。物理現象とは、切削力や振動、切削熱など加工を行う際に発生する現象のことで、工具や被削材の状態を把握して安全で信頼性の高い加工を行うために必要な情報である。本研究では、まず手始めとして物理現象の中でも予測情報としても用いられる切削力の測定を対象に考えていく。

一般的に、動力計に求められる条件は、以下の通りである[2-13]。

- (1) 切削機構に影響を与えない高い剛性
- (2) 固有振動数が大
- (3) 被削材の大きさや使用する工具を制限しない汎用性
- (4) それぞれが干渉することなく分力の測定が可能
- (5) 温度に対する安定性
- (6) 切り屑、切削油に対する頑強性
- (7) 安価

これまで動力計としては、ひずみゲージや圧電素子を利用したものが用いられている。ひずみゲージを用いた動力計としては八角リングなどがあるが、固有振動数や温度に対する安定性などの問題がある。また圧電素子を利用した動力計は、高い剛性や固有振動数を有しているものの、汎用性がなく一般的に高価である。また両方とも被削材や工具に接しているため、切り屑や切削油に対する保護が必要となる。そこで先に示した条件を満たすことが可能と考えられる方法として、各送り軸と主軸を駆動するモータからの電流値を基に切削力の測定を行うようにする。この方法ならば、工具や被削材と接することなく測定することが可能であるため、非常に有効であると考えられる。

Process diagnosis モジュール

実際の加工は長時間に及ぶため、びびり振動や工具欠損などの加工異常が発生した場合は、それを即座にしかも正確に認識して、それに適切に対応しなければならない。そこでこのモジュールは加工中に得られる情報から加工工程の診断を行う。これまで切削力に対しては、予めしきい値を求めておいたり、得られる信号波形に対して FFT 解析などを行い、びびり振動や工具欠損といった加工異常の検出が行われるのが一般的である。しかし、このような検出方法は、実際の加工前に切削試験を行って判定基準を設定する必要があるため、加工状況の変化に対応して診断

を行うのが困難であり、汎用性がない。そこで Prediction ブロックで予測された加工状況情報と検出された信号を比較することによって、加工工程の診断を行なうようにする。研究事例でも、汎用性のある工具摩耗推定手法として、実際の切削力情報と切削力予測モデルの情報に基に、加工をしながら工具摩耗量の推定を行う[2-14]といったことも試みられている。

図 2.3.6 は、加工工程の診断の流れを模式的に示したものである。このような比較を実時間で行えば、加工状況の良否やびびり振動、工具欠損などをインプロセスで検出することができ、予め切削試験を行う必要もなく、汎用性も維持することが可能である。これは機械のオペレータが、予め想定した加工状況と実際の加工状況の相違から、加工異常が発生しているかどうかを判断することに相当している。

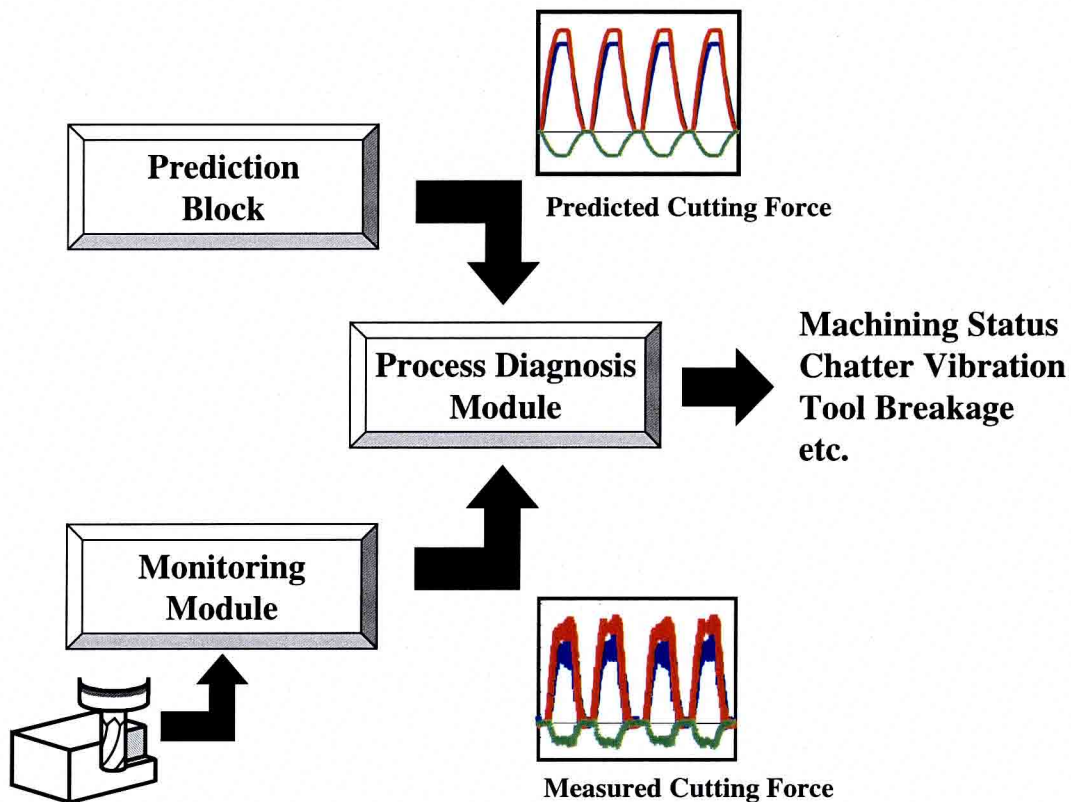


Fig.2.3.6 Process Diagnosis Flow of AIMac

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 3. 4 Strategy ブロック

Strategy ブロックは、図 2.2.1 からも分かるように Tool path generation モジュールと Cutting condition maintenance モジュールから成り立っている。

Tool path generation モジュール

現在の加工は、予め作成された NC プログラムを基に動作しているので、いったん加工を始めてしまうと、その NC プログラムに問題があった場合でも修正することができず、びびり振動や工具欠損といった異常に対処することができない。一章でも述べたとおり、工作機械の自律化・知能化がうまくいっていない理由の一つは、加工方法が事前に全て決定されて、変更することができないためと考えられる。そこでこのモジュールは、実時間で工具経路を生成すると共に、加工状況に対応して経路の修正を行う。

これまで工具経路生成に関して、幾つかの研究が行われている。予め NC プログラムを生成する CAM を研究の対象として、効率的な工具経路パターンや経路生成を行うアルゴリズムを確立し、生産性が高いと予想される NC プログラムの生成を目的としたものや[2-15, 2-16, 2-17]、精度の高い工具経路の生成を目的としたものである[2-18, 2-19, 2-20]。また実時間で工具経路を生成する研究も行われているが[2-21, 2-22]、工具経路データの生成から加工に至るまでの時間を短縮した生産性の向上や、数値情報から文字情報への変換の排除、膨大なブロックで構成される NC プログラムの生成回避が目的である。すなわち、本研究で意図している「加工状況に対応できる工具経路生成」は、これまでの研究とは、全く違う考え方である。

Cutting condition maintenance モジュール

切削条件の決定は、現在のところ CAM オペレータや工作機械のオペレータの知識や経験、勘といったものを必要としている。また実際に加工をする前に、CAM によって生成された NC プログラムに対して試し削りを行い、切削条件の修正を行っている。しかし、この方法は、トライアンドエラーを繰り返すので多くの時間が必要である。特に金型製作のような一品生産の場合は全製作時間に占める割合が大きく、低コストや短納期といった要求を満たすためには、この試し削りの時間を短縮することが重要な課題の一つといわれている[2-23]。他にも加工中は、オペレータが加工状況に応じて送り速度や主軸回転数のオーバーライド値を変更して、加工状況や加工トラブルに対応している場合も少なくない。

そこでこのモジュールでは、機械のオペレータに依存せずに自律的に加工状況に対応して切削条件の決定を行う。そのために予測情報や計測情報のような数値情報を条件決定に反映できるような仕組みを実現する必要がある。

図 2.3.7 は、従来の加工と AIMac による加工の比較を示している。従来の加工では、作業者が現場で経験や知識、勘に基づく感覚的な判断で実際の加工に対応しているが、AIMac では、このような個人の技術を数値化して対応する。近年では、低コスト、短納期の要求が厳しく、試し削りなどを行う時間は少ない。従って加工前に決定される切削条件は、安全率を大きくとる場合も

少なくとも、工作機械の性能を十分に引き出しているとは考えられない。これまで感覚的な判断で行われてきた事柄を数値化することで、製品精度を一定以上に保つと共に工作機械の能力を十分に利用した加工を実現できると考えられる。また、このような機能を加工中に活用するので、加工の準備期間を少なくすることも可能である。

実時間で切削条件を修正する研究としては、適応制御が有名である[2-24, 2-25]。これらは切削力の大小から送り速度を変化させる単なるフィードバックではなく、切削現象を制御系に組み込み、被削材や切削条件によって変化する制御系のゲインを推定しながら、切削力が一定になるように送り速度を変化させている。現状では、最新のNC装置を利用しようとする場合、様々な理由から完全な適応制御を実現することはできないが、このように実際の加工中に切削条件の変更を行い、適切な加工を行うのは非常に重要である。しかしながら、これまでの研究でも変更される切削条件は送り速度だけであり、切削条件に完全に対応した加工ができるとは言いきれない。また予測情報を積極的に利用していないので、加工状況への対応も後手にならざるをえない。このようなことから、加工中に予測情報と計測情報の両方を反映できるようにし、柔軟に切削条件を変更できるようになれば、自律的な加工を実現することができる。

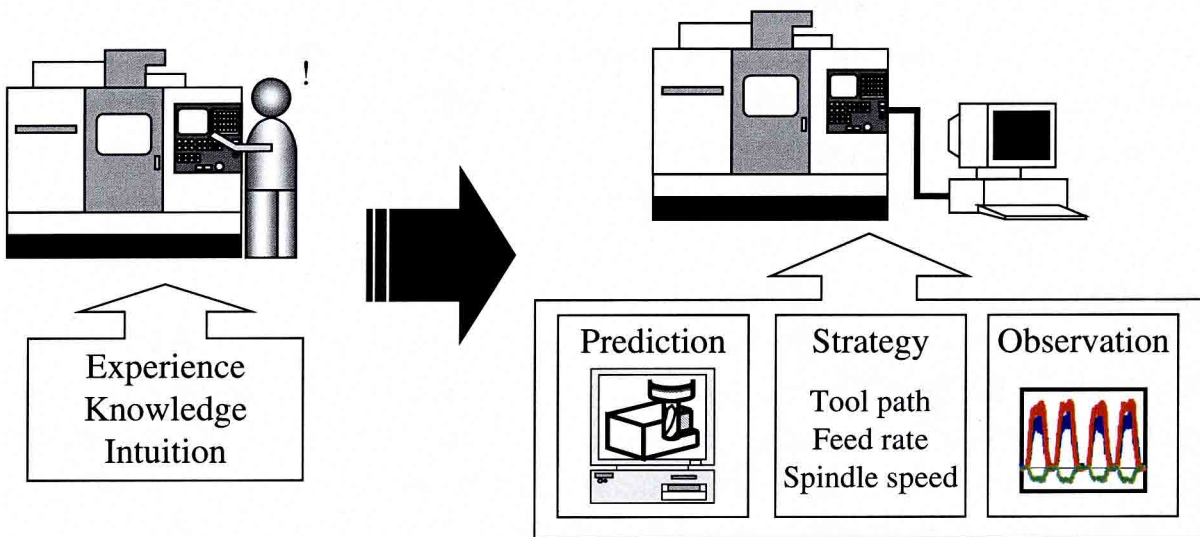


Fig.2.3.7 Comparison of the conventional machining and AIMac machining

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 4 ブロック間の情報の流れ

前節では、各ブロックごとの果たすべき役割について述べてきたが、実際に AIMac を構築するには、ブロックを構成するモジュール間の情報の流れを明らかにする必要がある。ここでは、表 2.1.1 を参考に以下の 4 つの状況ごとに、情報の流れを整理した。

1. プリプロセス
2. インプロセス 1
3. インプロセス 2 (フィードバック)
4. ポストプロセス

図 2.3.8～図 2.3.11 は、AIMac の各プロセスにおける Management, Prediction, Observation, Strategy ブロック間の情報の授受を表している。これらの図における黒い矢印と数字が情報の流れに相当している。各プロセスの詳しい説明を以下に示す。

プリプロセス

図 2.3.8 にプリプロセスにおける情報の流れを示す。プランニングモジュールは、1 から準備された 2 とデータベースから提供される 3 を用いて工程設計や作業設計を行う。4 は工具経路を生成するために、Strategy ブロックの Tool path generation モジュールに提供され、5 は Cutting condition maintenance モジュールに提供される。また加工工程を予測するために、6 が Prediction ブロックに提供される。加工終了後や加工中断が起こった場合は、Prediction ブロックから 7 が Planning モジュールに提供され、再び工程や加工順序の決定が行われる。

インプロセス 1

図 2.3.9 にインプロセス 1 における情報の流れを示す。Management ブロックで決定された加工順序を基に、工具経路モジュールは実時間で CL データを生成し 1 を Cutting condition maintenance モジュールに渡す。Cutting condition maintenance モジュールは 2 を Prediction ブロックに提供し、加工工程の予測を行われた後、3 から加工が正常かどうかの判断が行われる。

加工に問題があれば、切削条件（送り速度、主軸回転数）の変更が行われる。それでも問題が解消されない場合は、4 が Tool path generation モジュールに提供され CL データの変更が行われた後、同じ処理が繰り返される。加工に問題がない場合は、4 が提供された後 5 の情報を基に加工が行われる。

インプロセス 2 (フィードバック)

図 2.3.10 にインプロセス 2 における情報の流れを示す。Monitoring モジュールは 1 から 2 の情報を Process diagnosis モジュールに提供し、そこで加工状況の診断が行われる。また 3 を Cutting condition maintenance モジュールに提供し、切削力やスピンドルロードが一定になるようにする。

もしびり振動などの加工トラブルが発生した場合には、4 が Cutting condition maintenance モ

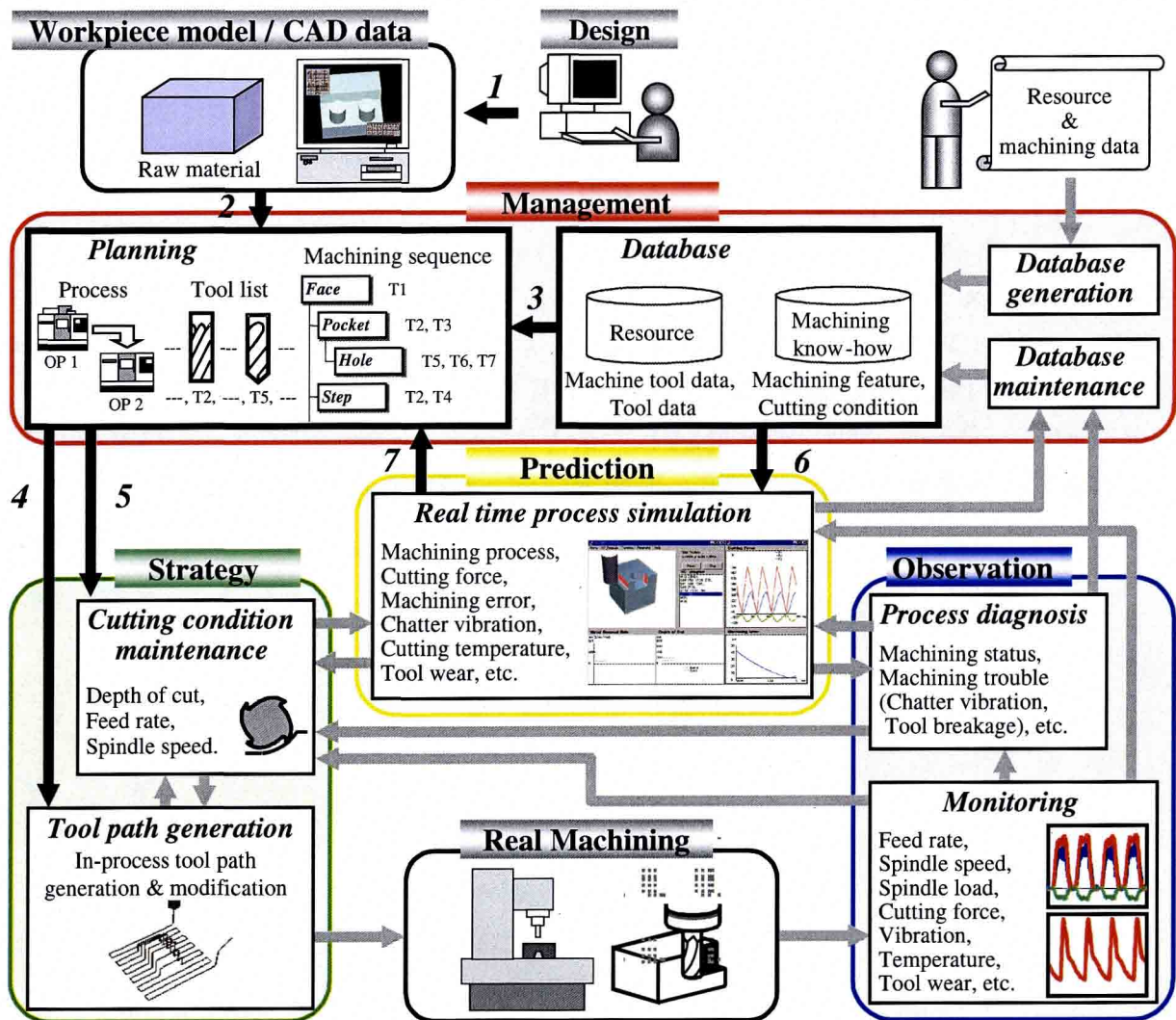
ジュールに提供されて、送り速度や主軸回転数の修正が行われる。それでも加工トラブルが回避できない場合は、Tool path generation モジュールにおいて工具経路の修正が行われて、インプロセス1と同様に加工状況が予測され加工が行われる。

また5は加工状況を診断するために Prediction ブロックから Process diagnosis モジュールに提供される。6は工具欠損などの工具の交換を必要とする場合に Prediction に提供されて、プリプロセスで示したように Prediction ブロックから Planning モジュールに形状データを提供する流れにつながる。7は Monitoring モジュールから Prediction ブロックに提供され推定精度を維持するために切削係数の更新が行われる。

ポストプロセス

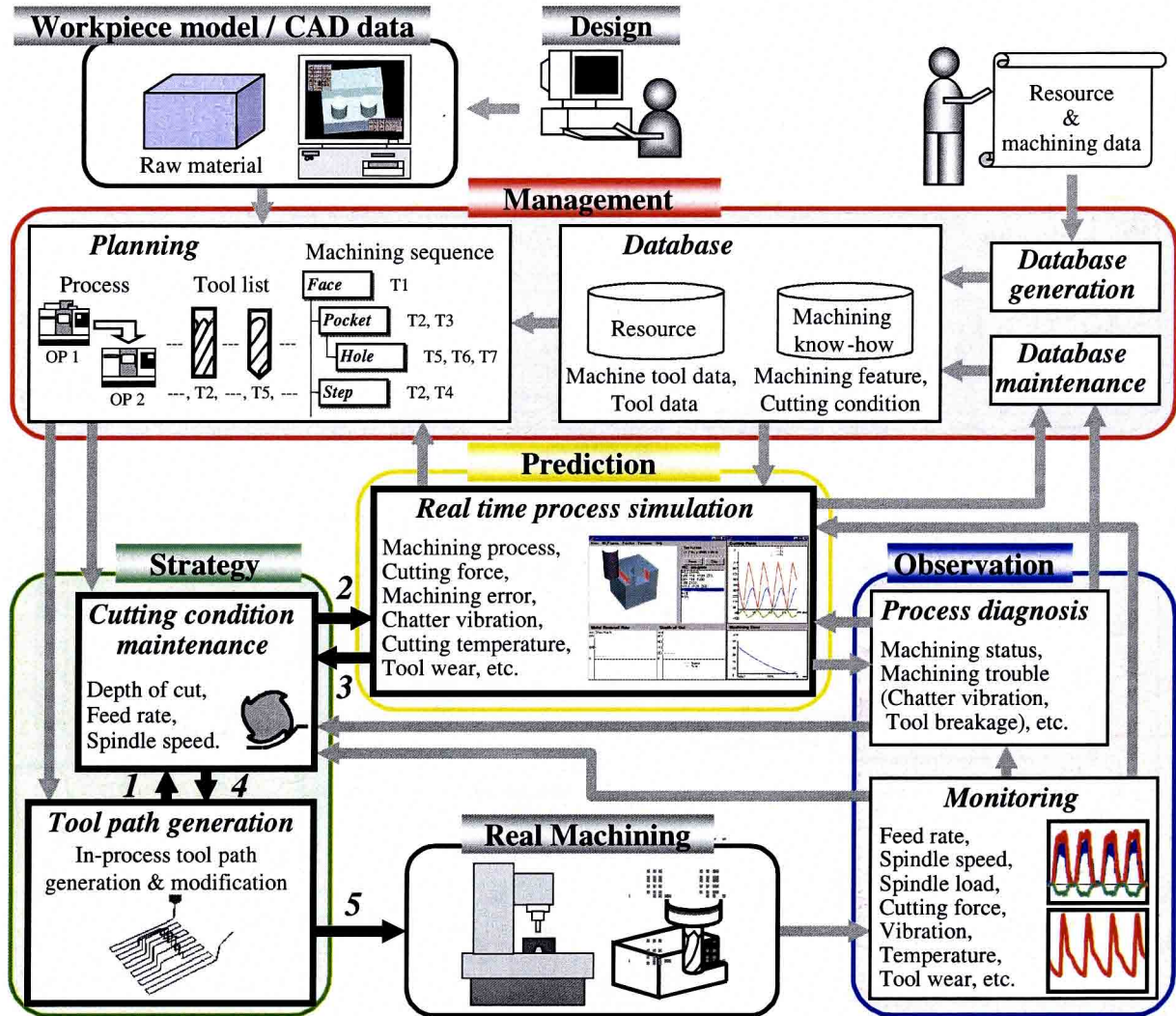
図2.3.11にインプロセス2における情報の流れを示す。1と2が Prediction ブロックと Observation ブロックから Database maintenance モジュールに提供され、3がデータベースに保存される。また Database generation では、4のような技術者や工作機械メーカー、工具メーカーから提供される情報の登録や必要のなくなった情報の削除のために、5をデータベースに供給する。

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)



- 1: 製品形状データ
- 2: 被削材モデル, 加工部品の CAD データ
- 3: リソースデータ (機械能力, 工具能力), 切削条件
- 4: 工具リスト, 加工順序, 切削条件 (切込み, 加工モード)
- 5: 切削条件 (送り速度, 主軸回転数)
- 6: リソースデータ (機械剛性, 工具剛性, 切削係数)
- 7: 加工形状データ, 加工精度データ

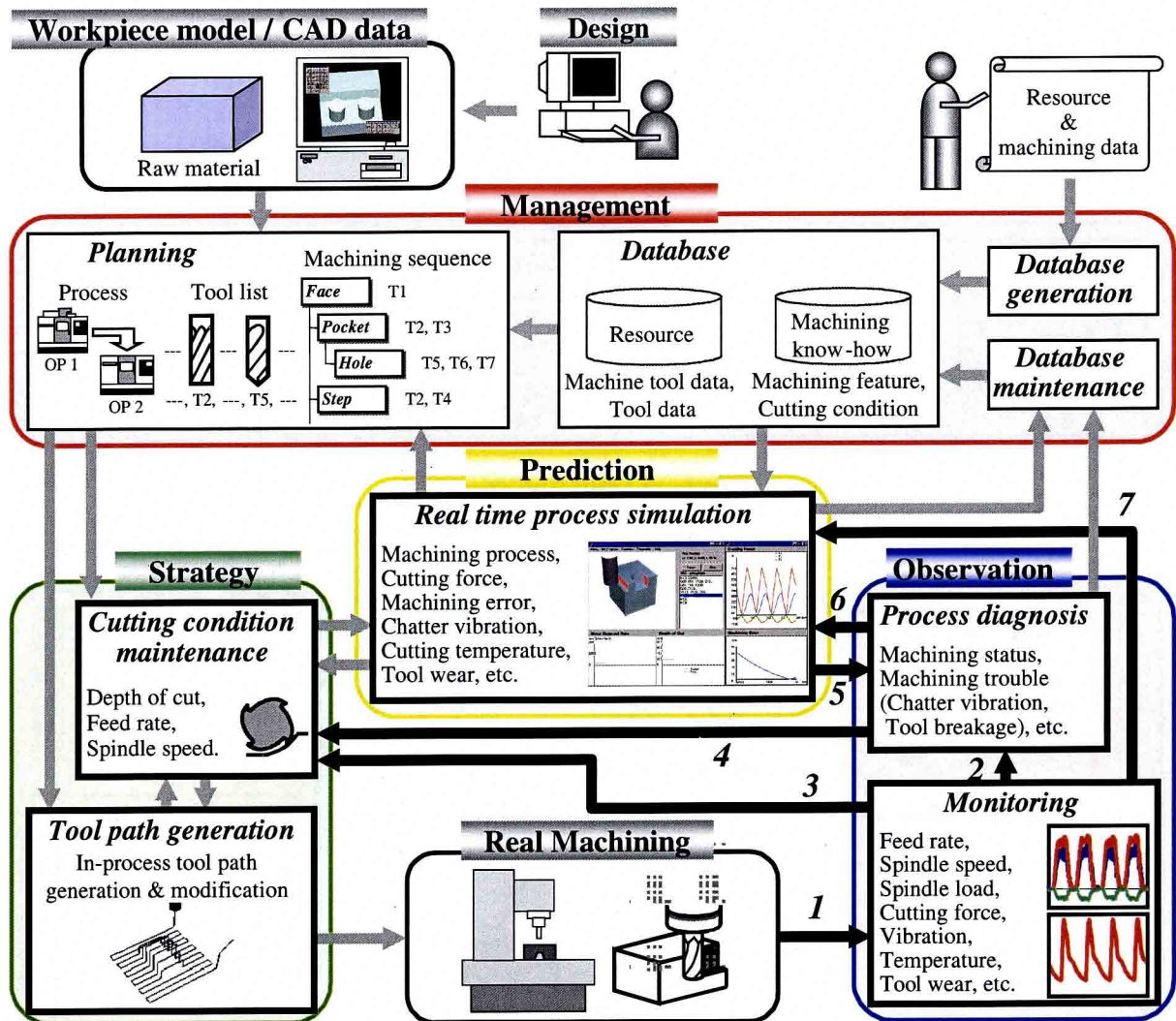
Fig.2.3.8 Data flow in AIMac (pre-process)



- 1 : CL データ, 送りモード (切削送り, 早送り)
- 2 : CL データ, 送りモード (切削送り, 早送り), 主軸回転数, 送り速度
- 3 : 切削状態, 切込み
- 4 : 主軸回転数, 送り速度 or 切削状態 (加工に問題がある場合)
- 5 : CL データ, 送りモード (切削送り, 早送り), 主軸回転数, 送り速度

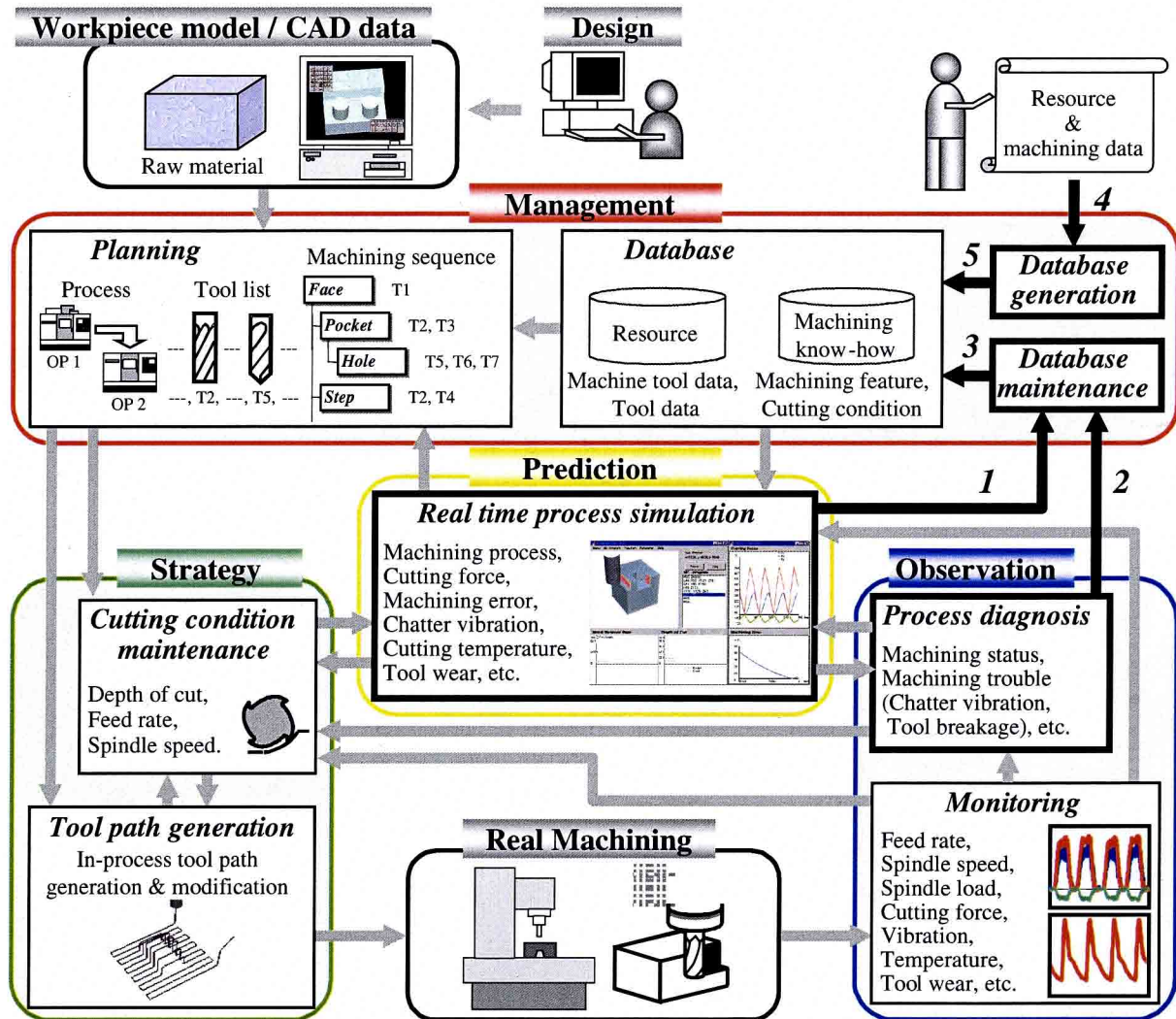
Fig.2.3.9 Data flow in AIMac (in-process1)

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)



- 1: 加工状況
- 2: センサ信号 (切削力, スピンドルロード)
- 3: 切削力, スピンドルロード (切削力適応制御を行うため)
- 4: 検出された加工異常の情報 (びびり振動など)
- 5: 推定情報
- 6: 検出された加工異常の情報 (工具欠損など)
- 7: 切削力 (切削係数更新のため)

Fig.2.3.10 Data flow in AIMac (in-process2)



- 1: 抽出された切削条件, 切削係数
- 2: 検出された切削条件, 加工判定結果
- 3: データベース更新用の加工情報, 切削係数情報
- 4: 技術者や各メーカーより提供されるリソース情報, 加工情報
- 5: 提供された各種データ, 必要のなくなった情報の削除指令

Fig.2.3.11 Data flow in AIMac (post-process)

2. 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

2. 5 まとめ

今後、工作機械に求められていく機能を明らかにし、次世代型工作機械 AIMac の概念構造とシステム構成を提案した。またシステムを構成する4つの機能ブロック (Management, Prediction, Observation, Strategy) が果たすべき役割とプロセス、各ブロックを構成するモジュール間の情報の流れを明らかにした。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 1 ヴァーチャルマニュファクチュアリングの定義

コンピュータの飛躍的な性能向上を背景に、設計や製造のコンピュータ支援技術の進歩は目覚しく、CAD/CAM/CAEといったシステムの導入による効率化が進められている。このような現状から国内外で、製品を実際に作るまでの試行錯誤を最小限に抑えることを実現する仮想生産（ヴァーチャルマニュファクチュアリング）に対する関心が高まっている。ところで、このヴァーチャルマニュファクチュアリングという言葉の定義は、一般的に「コンピュータ内での生産」とされるが、これでは曖昧すぎるので、もう少し具体的な定義をしておく。

今までに行われたヴァーチャルマニュファクチュアリングに対する定義について以下に紹介する。岩田らは、仮想環境の中で行われるヴァーチャルマニュファクチュアリングに対し、情報変換機能の等価性に注目した定義を与えた。すなわち現実の製造を「物質」、「情報」、「エネルギー」に対する変換であると考えた場合、ヴァーチャルマニュファクチュアリングは、現実の製造における「物質」と「エネルギー」を情報化して、現実の製造と等価な「情報」と情報化された「物質」と「エネルギー」に対して行うことと定義している[3-1]。Maryland.大学 ISR (Institute for Systems Research)のCIM Lab.では、ヴァーチャルマニュファクチュアリングを、製品の設計と生産を助けるために製造工程のコンピュータモデルとシミュレーションを使用するものと定義している[3-2]。またV. Marinovは、ヴァーチャルマニュファクチュアリングを、製造工程の一つまたはその他の属性（部品設計、工程設計、工程管理、品質など）の質を高めるために、製造対象、プロセス、属性や原理といった抽象的特徴が進化するシステムと定義している[3-3]。前川とT.H.C. Childsは、ヴァーチャルリアリティの製造現場における使用例の一つとして捉えている。これは言い換えれば、製造段階でのCAEとして定義している[3-4]。

本研究ではヴァーチャルマニュファクチュアリングを、生産システムの技術革新をするための知能化技術の一つとして捉える。すなわち、プロセスモデルを用いて実際には把握することが難しい物理現象（力や熱など）を予測し、それに対応する指針を与える技術と定義する。特に本研究では、ヴァーチャルマニュファクチュアリングには欠かすことのできない要素である仮想加工（ヴァーチャルマシニング）を取り扱っていく。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 2 VMSim のシステム構成

まず、これまで行われてきた切削加工のコンピュータシミュレーションに関する研究について紹介する。W. P. Wang と K. K. Wang は、規則的な物体が移動することによって生成される工具除去体積 (swept volume) を計算する一般的な手法を提案し、工具の動きに応じた被削材の形状変化を表現することを実現した[3-5]。高田らは形状シミュレーションと物理シミュレーションを統合し、被削材の形状変化だけでなく加工中に発生する切削力と加工誤差の推定を可能にした[3-6, 3-7]。朝比奈らは、設計段階でエンドミルの加工精度を評価することができるシステムを開発した[3-8]。D. Blackmore と M. C. Leu は、不規則な形状をした物体の除去体積を生成できるように SDE (Sweep Differential Equation) 法を導入し、加工誤差 (工具のたわみ) を被削材ソリッドモデルに直接的に表現できるようにした[3-9]。しかし計算される工具のたわみは、平均的な切削力から求められるものであり、実際の加工誤差とは一致するとは考えられない。このような切削モデルは、加工現象の予測という観点からすれば明らかに間違いである。前川らは、旋削加工を対象に切削力だけでなく切削温度や表面粗さを求めることができる 3D-VMS と呼ばれるシステムを開発した[3-4]。しかし正確なシミュレーションのために膨大なデータベースや処理時間を必要とし、切削加工を評価するというよりは切削加工現象を詳細に再現するためのシミュレーションといえる。乾らはデクセル表現に基づくシミュレーションを拡張し、切削加工面の状態を高品位に可視化することを可能にし[3-10]、また藤尾らは CAM に適した形状モデリング手法として、複雑な形状をソリッドモデルとして精度良く表現できる Boundary-Map 法[3-11]を提案している。しかしこれらは、加工形状の現実的な表示や高速なグラフィックスの表示に重点が置かれているので、本研究で必要とされる加工工程の予測とは大きく異なっている。

本研究では、開発した VMSim のシステム構成を図 3.2.1 に示す。VMSim はスクエアエンドミルによる加工を対象としたもので、形状シミュレータ、物理シミュレータの 2 つのモジュールから構成されている。形状シミュレータでは、被削材と工具形状、NC データが入力されると被削材の形状変化を計算すると共に、指令命令に明示されていない切込みなどの切削条件を抽出することが可能である。また物理シミュレータでは、抽出されたパラメータを基に加工中の切削力や加工誤差を推定することが可能である。さらに VMSim は、推定された情報を基に、送り速度を変化させることによって、加工工程を適切なものに修正することも可能である。

図 3.2.2 に実行画面の一例を示す。左上に切削工程のグラフィックイメージ、その隣に NC プログラム、左下に金属除去量、切込みである。また必要に応じて物理シミュレーションを用いて、切削力や切削トルク、加工誤差を推定する。図においては、右上に切削力波形、右下に加工誤差が表示されている。

このシミュレータの各モジュールに関しては、形状シミュレータを 3. 3 節で、物理シミュレータを 3. 4 節で、NC プログラムの修正を 3. 5 節で詳しく説明していく。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

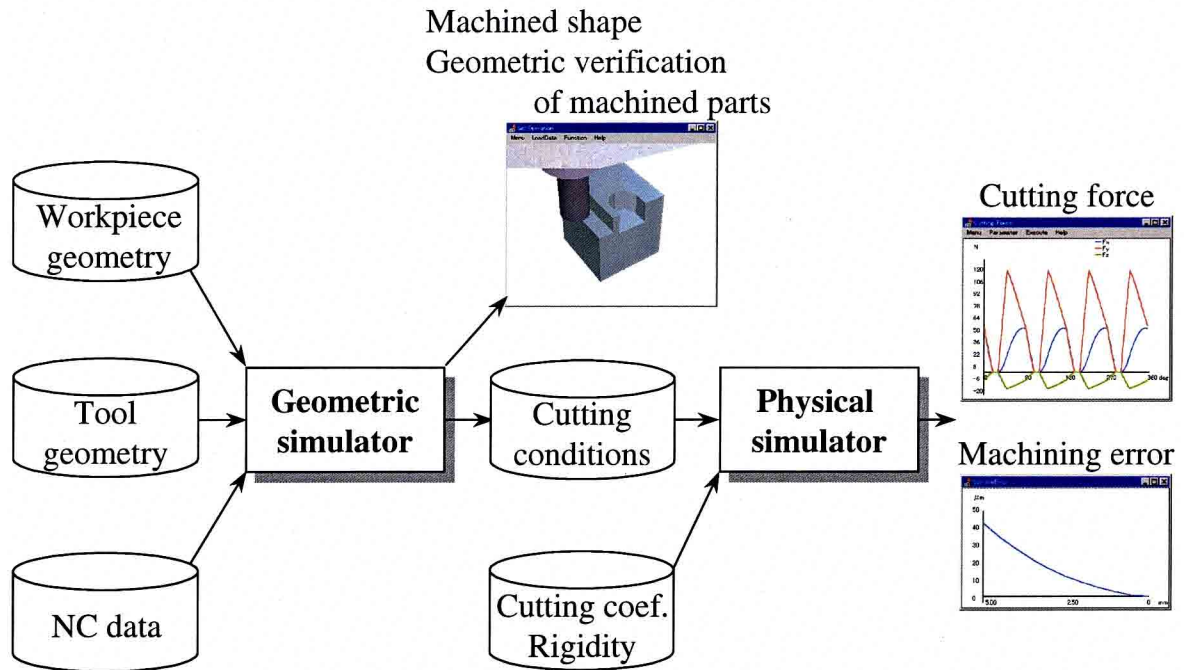


Fig.3.2.1 System Architecture of VMSim

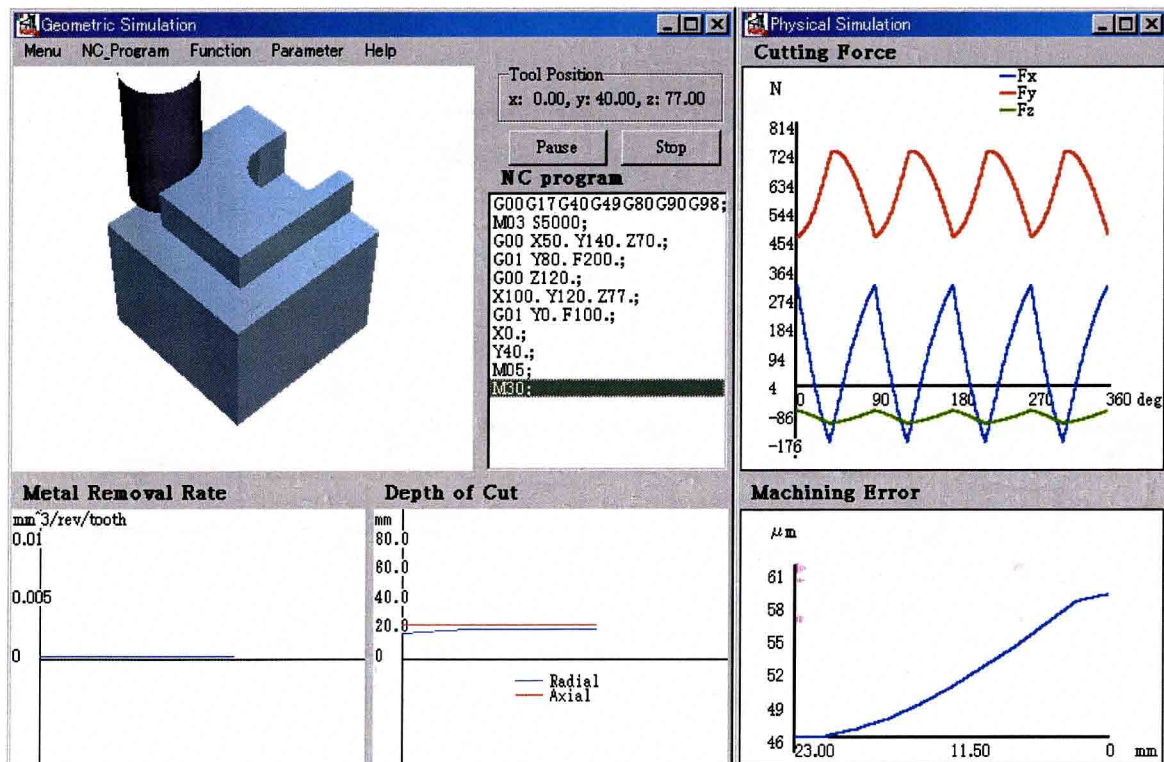


Fig.3.2.2 Output Example of VMSim

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 3 形状シミュレータ

近年のコンピュータ環境およびソリッドモデリング技術の発達により、3次元立体のモデリングが容易に実現されるようになった。本節では、これらの手法を用いて工具の動きの応じた被削材の形状変化を計算すると共に切込みや金属除去率といったパラメータを抽出する方法について説明していく。

3. 3. 1 集合演算

集合演算とは、2つの立体の集合和 (union), 集合差 (subtraction), 集合積 (intersection) をとるものである[3-12]。図 3.3.1 に示すように、それぞれ+, -, *という記号で一般的に表される。ここで集合和とは、空間内に存在する2つの立体 A, B に対して A か B のいずれかの内部に存在するような集合であり、集合差とは、例えば A の内部で B の外部であるような点の集合であり、集合積とは、A の内部でありかつ B の内部であるような点の集合である。これら集合和、集合積、集合積を用いれば様々な立体を定義できる。すなわち、コンピュータ上で CAD/CAM といった支援システムを実現する上で欠くことのできない技術である。

本研究では、図 3.3.1 のおける立体 A と立体 B の関係を、被削材と 3. 3. 2 で説明する工具除去体積に置き換えて差演算を施し、被削材が工具によって加工される時の形状変化を表現している。

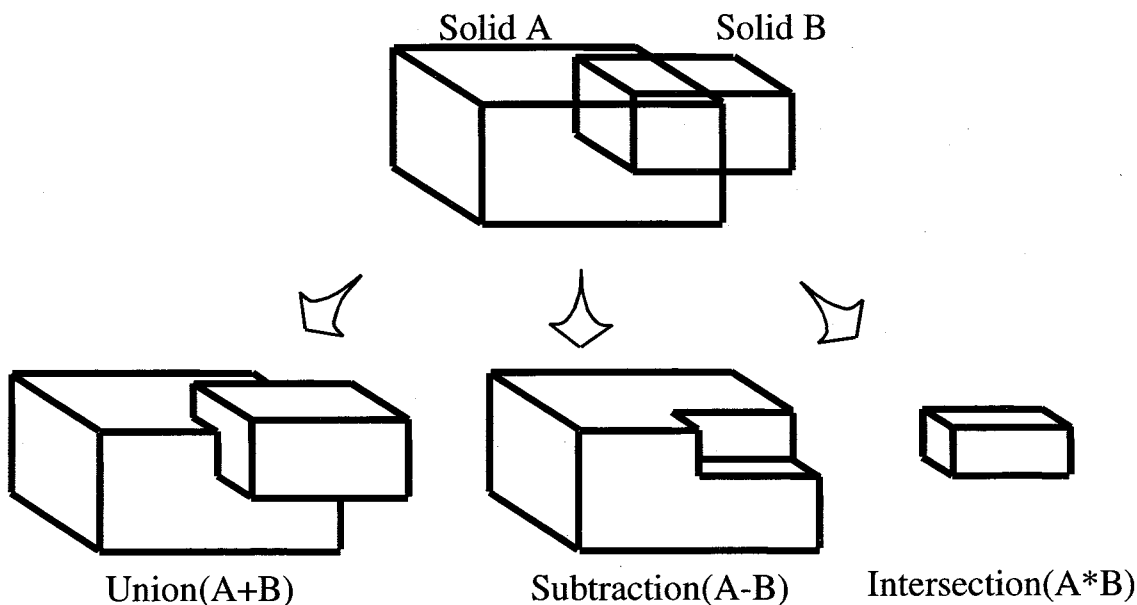


Fig.3.3.1 Boolean Set Operation

3. 3. 2 工具除去体積の生成

まず、物体が移動することによって生成される除去体積のための形状モデリングに関する一般的な理論について述べる[3-5].

除去体積を生成するために移動物体は次のことを満たしていなければならない.

- 1) 移動関数は細分化できる.
- 2) 移動物体は、凸平面の集合したものである.
- 3) 移動物体の平面は、規則的な平面である.

2) と 3) は簡単に表現すると、これらの境界平面は尖った点、稜線 (境界稜線を除いて) が無い、あるいは、自己交差していないということである.

移動物体が上述の条件を満たす時、除去体積は次の二つの部分から成り立っている.

- 1) 最初と最後の位置での移動物体の境界の部分集合
- 2) 物体の移動中に新たに生成される平面 (包絡面)

1) は物体を構成する点の座標と移動関数から求められるので、2) の包絡面を求める方法について述べていく.

まず、2次元平面上を動くことによって生成される包絡線 (包絡面) の生成方法について説明する. 2次元カーブの集まりを次式のようなパラメータの形で表現すると、包絡線は図 3.3.2 のようになる.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, t) \quad (3.3.1)$$

ここで u はカーブパラメータで、 t は時間変数である. この時、それぞれの位置での接線方向に包絡線 e が存在する. それゆえ e 上の点において次の式が成り立つ.

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{d\mathbf{e}}{dt} = 0 \quad (3.3.2)$$

ここで、 $\partial \mathbf{r} / \partial u$ はカーブ上の接線であり、 $d\mathbf{e} / dt$ は包絡線の接線を表す. 代わりに、

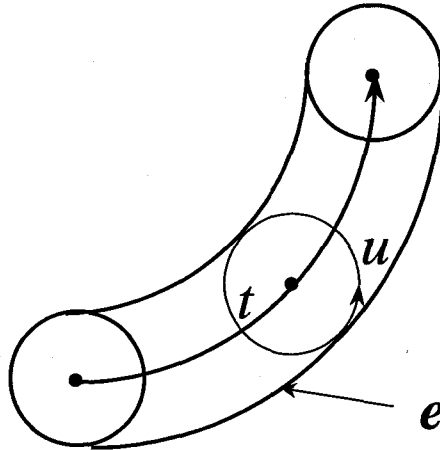
$$\frac{d\mathbf{e}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}(u(t), t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \quad (3.3.3)$$

を式 (3.3.2) に代入すると

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} = 0 \quad (3.3.4)$$

3. ヴァーチャルマシンニングシミュレータ (VMSim)

包絡線は、 u を t で表わすことで解析的に解くことができ、そして式 (3.3.1) を一つのパラメータで表現することができる。



e : Envelope
 t : Time Parameter
 u : Curve Parameter

Fig.3.3.2 Parameterized Curve Parameter

もし、カーブが $g(x,y,t)=0$ で表現されるなら、異なったアプローチが必要になる。図 3.3.3 に示されるような、2つのカーブ $g(x,y,t)$ と $g(x,y,t+\delta t)$ の交差を考える。

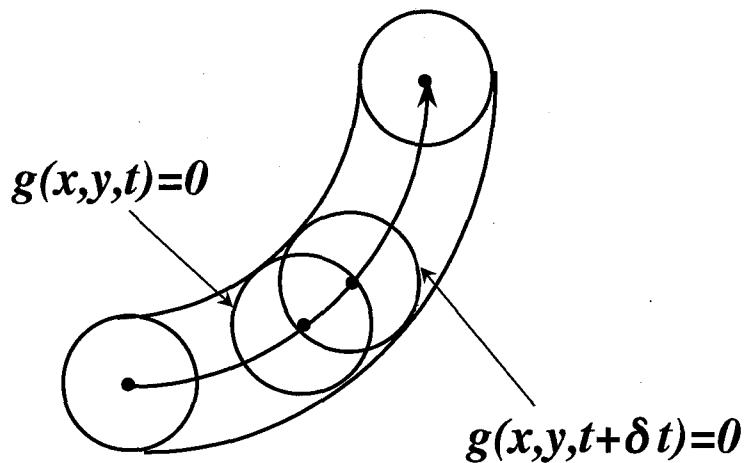


Fig.3.3.3 General Expression of Swept Volume

$\delta t \rightarrow 0$ の時、包絡線は交差に集まる。交差では、 $g(x,y,t) - g(x,y,t+\delta t) = 0$ なので、包絡線上の点が $\partial g / \partial t = 0$ を満たすことが導かれる。それゆえ包絡面を求める条件は以下のようになる。

$$g(x, y, t) = 0, \frac{\partial g}{\partial t}(x, y, t) = 0$$

3次元空間における包絡面に関して、移動平面を $g(x, y, z, t)$ と表すと、

$$g(x, y, z, t) = 0 \quad (3.3.5)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t}(x, y, z, t) = 0 \quad (3.3.6)$$

を満たすならば、この点は包絡面上にあると見なしてよい。ここで x, y, z は、立体を構成する点の3次元座標、 t は時間変数である。このままでは、3次元立体が生成する包絡面を求めるのが困難であるので、定式化するために、境界表面が $r = r(u, v, t)$ として定義できる立体の場合について考えていく。ここで u, v は、 $(u, v) \in R^2, u_0 \leq u \leq u_1, v_0 \leq v \leq v_1$ で、これらのパラメータで表される立体についての式を求める。

この時、包絡面がすべての接触点での物体の接線であるという性質を使う。これは、すべての接触点での移動物体の法線 N_r が包絡面の法線 N_e と平行であることを意味する。ここで、 N_r は定義により、

$$N_r = \frac{\partial r}{\partial u} \times \frac{\partial r}{\partial v} \quad (3.3.7)$$

また包絡面の集まり e は、次式で表現される。

$$e = r(u(v, t), v, t) \quad (3.3.8)$$

よって N_e は次のように計算される。

$$N_e = \frac{\partial e}{\partial v} \times \frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial r}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial r}{\partial v} \right) \times \left(\frac{\partial r}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial r}{\partial t} \right) \quad (3.3.9)$$

$N_r \neq 0, N_e \neq 0$ と仮定すると、以下の式が成り立つ。

$$N_e \times N_r = 0 \quad (3.3.10)$$

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

式 (3.3.5) と (3.3.7) を式 (3.3.8) に代入し変形すると次の式を得る.

$$\begin{aligned}
 N_e \times N_r &= \left(\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \times \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right) \times \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \\
 &= \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right) \left(\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \right) \\
 &\quad - \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \left(\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \right) \\
 &= \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \right)
 \end{aligned} \tag{3.3.11}$$

それゆえ

$$\left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right| = 0 \tag{3.3.12}$$

なぜならば

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \neq 0 \tag{3.3.13}$$

が, 規則的な平面に対して成り立つからである. よって式 (3.3.12) のようにヤコビアン $\partial(x, y, z) / \partial(u, v, t)$ が 0 であることは, 包絡面を求める際の指標となり得る.

導出された式の有効性を確認するため, 例として図 3.3.4 に見られるような, 半径 ρ の球体がグローバル座標系の原点から半径 R の円弧を描いて動く場合を考える. 左図に示すように, 球のボディ座標系は,

$$\mathbf{r}_s = (\rho \sin \theta \cos \phi, \rho \sin \theta \sin \phi, \rho \cos \theta) \tag{3.3.14}$$

また球の中心の動きは右図に示すように,

$$\mathbf{r}_0 = (R \cos t, R \sin t, 0) \tag{3.3.15}$$

よって,

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_s + \mathbf{r}_o = (R \cos t + \rho \sin \theta \cos \phi, R \sin t + \rho \sin \theta \sin \phi, \rho \cos \theta) \quad (3.3.16)$$

$d(x, y, z) / d(u, v, t)$ を適用すると次のような結果を得る.

$$t = \phi \quad (3.3.17)$$

それゆえ, 包絡面は以下のようなになる.

$$\mathbf{e}(\theta, \phi) = (R \cos \phi + \rho \sin \theta \cos \phi, R \sin \theta + \rho \sin \theta \sin \phi, \rho \cos \theta) \quad (3.3.18)$$

これはトーラスである.

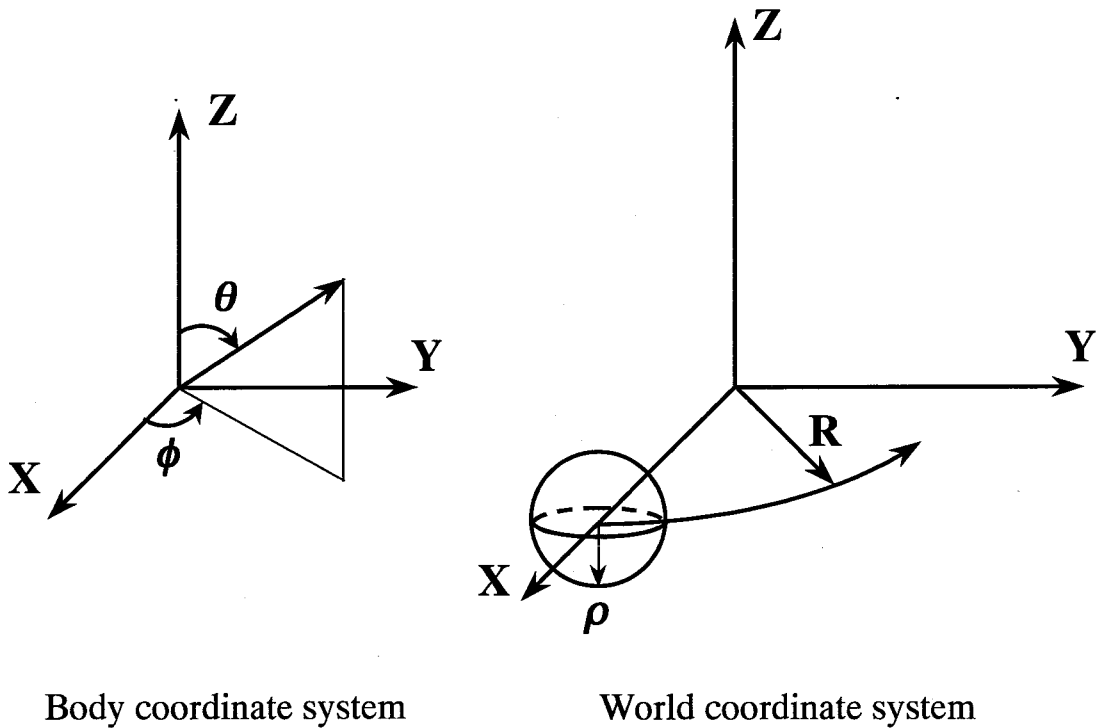


Fig.3.3.4 One example of swept volume generation (torus)

本研究では, スクエアエンドミルを図 3.3.5 のように円柱としてモデリングし, この手法を適応して式 (3.3.12) に基づき包絡面を求め, 工具除去体積を生成する.

シミュレータ内では, 読み込まれた CL データを微小長さの工具移動セグメントに分割し, その工具移動セグメントと工具モデルを基に工具除去体積を算出する. そして被削材モデルと求められた工具除去体積に 3. 3. 1 節で説明した差演算を施し, 図 3.3.6 に示すように被削材が工具によって加工される様子を表現している. またその際に, 3. 3. 3 節で説明する方法で半径方向切込み, 軸方向切込みを抽出している.

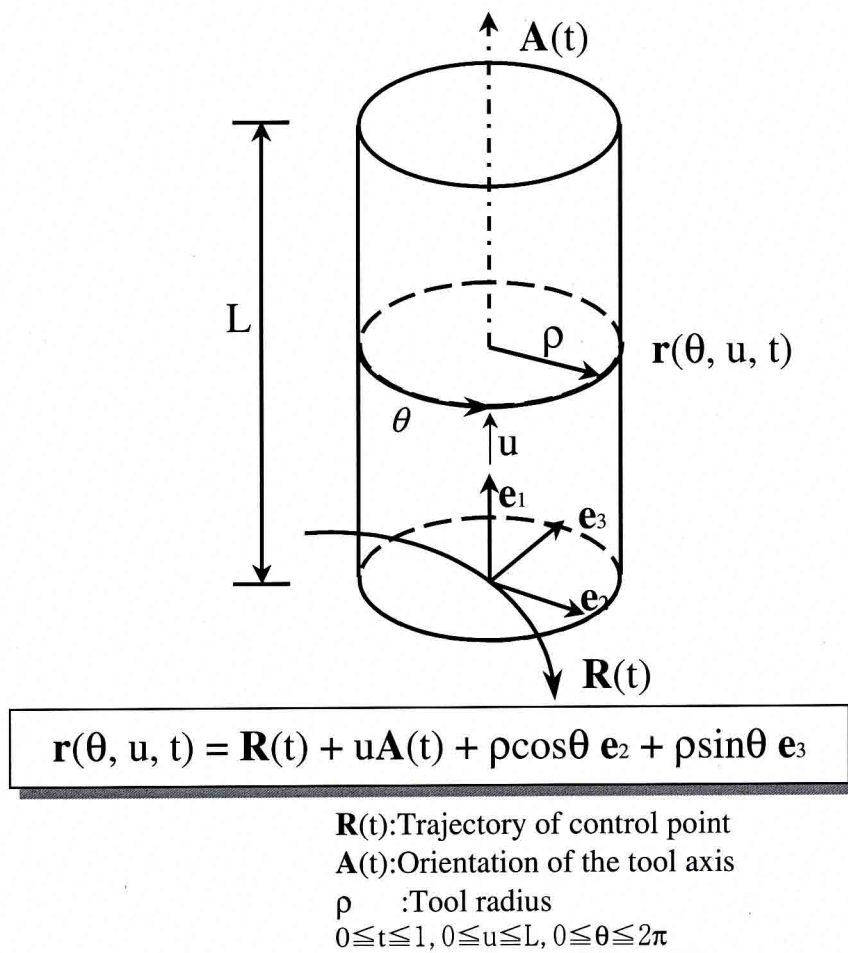


Fig.3.3.5 Parameterization of the Cylinder Cutter

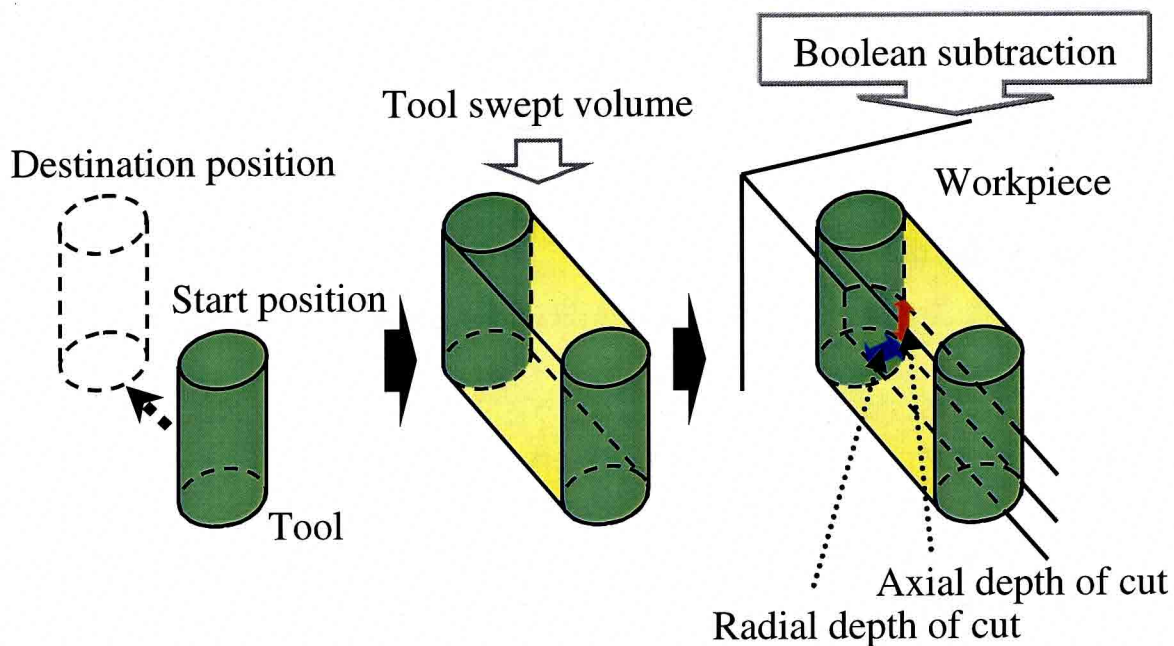


Fig.3.3.6 Boolean Subtraction Between Workpiece and Tool Swept Volume

3.3.3 切込みと金属除去率の算出

切込みや金属除去率は、経路情報には明示されていないが重要なパラメータである。形状シミュレーションでは、被削材モデルおよび工具除去体積モデルからこれらのパラメータを求める。以下に算出方法について説明する。

1) 切込みの算出

まず被削材モデルと工具除去体積モデルとの間に差演算を施す際に、同時に積演算を施しておく。さらに工具の現在の位置と一つ前の位置から、工具の移動関数を求める。この時、半径方向切込みは、積演算で求められる立体を構成する頂点（以下頂点）と工具モデルから図 3.3.7 のように求められる。すなわち、移動関数により工具モデル底面を2つの領域に分けて、それぞれ左図のように2つの領域に頂点がある場合、右図のように片方の領域に頂点がある場合に分けて、半径方向切込みを求める。軸方向切込みは、全ての頂点から、工具軸方向の座標値が最大のものと最小のものとの差をとって求めている。

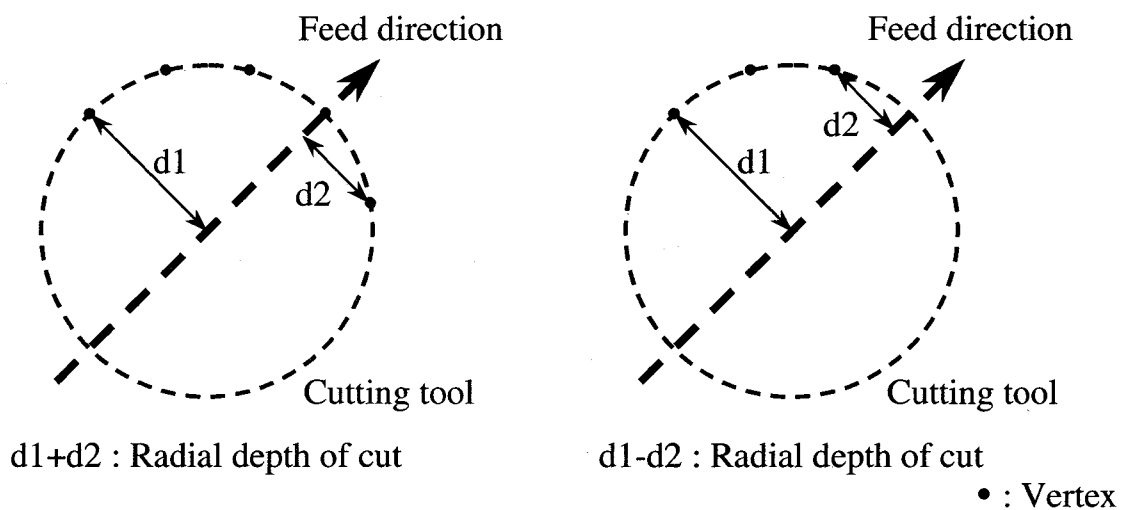


Fig.3.3.7 Calculation Method of Radial Depth of Cut

2) 金属除去量の算出

本研究ではスクエアエンドミルによる加工を対象としているので、その算出方法について説明する。スクエアエンドミルによって取り除かれる体積は、図 3.3.8 に示すように直方体の体積として求めることができ、式で表現すると以下のようなになる[3-13]。

$$Q = d \times a \times D \quad (3.3.19)$$

ここで d は半径方向切込み、 a は軸方向切込み、 D は移動距離で、 Q は除去体積である。さらに、エンドミルの刃数を u 、主軸回転数を N 、送りを f とすれば、一刃当たりの金属除去量 MRR は以下のように表すことができる。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

$$MRR = \frac{Q \times f}{u \times N \times D} \tag{3.3.20}$$

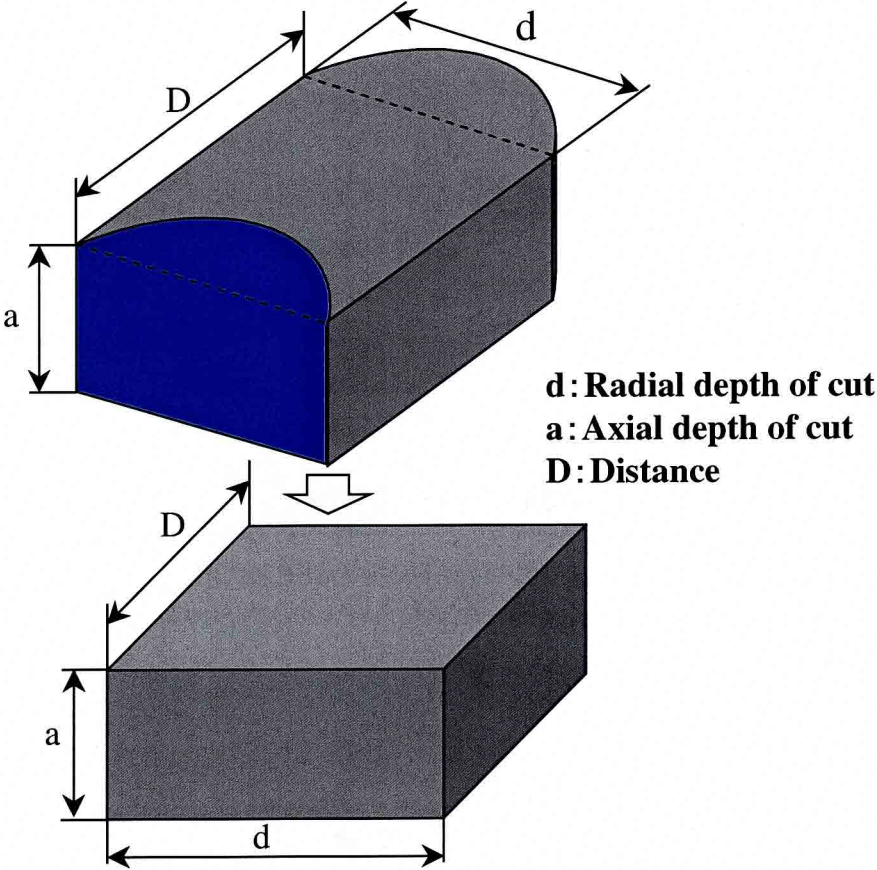


Fig.3.3.8 Calculation Method of Metal Removal Rate

3. 4 物理シミュレータ

一般的にエンドミルによる加工の生産性は、その切削機構上、工具たわみによる加工誤差の増加や、低剛性・低減衰性に起因するびびり振動の発生に大きく影響される。従って加工中の切削力や加工誤差を予測することは極めて重要であると言える。

本章では、3. 3節で説明した形状シミュレーションにより抽出された切削条件と工具・被削材データから、切削加工モデルに基づき、加工中に発生する切削力や加工誤差を推定する物理シミュレーションについて説明する。

3. 4. 1 切削加工モデルの分類

エンドミルの切削加工モデルは、Smith と Tlustý により考慮する条件に応じて、次のような 5 種類に分類され、その特徴と有効性が紹介されている[3-14].

1. 平均切削力モデル

(Average Rigid Force, Static Deflection Model)

2. 瞬間切削力モデル

(Instantaneous Rigid Force Model)

3. 瞬間切削力モデル, 静変形モデル

(Instantaneous Rigid Force, Static Deflection Model)

4. 工具変形を考慮した瞬間切削力モデル

(Instantaneous Force with Static Deflection Feedback Model)

5. 切り屑再生効果を考慮した切削力モデル, 動変形モデル

(Regenerative Force, Dynamic Deflection Model)

本研究では、上述した 5 つのモデルの内、2 番目と 3 番目に相当するモデルを用いて切削力と加工誤差の推定を行う。

2 番目のモデルは現実的な切削力の計算を行うために、エンドミルの微小要素ごとに計算が行われる。個々の微小要素に作用する切削力は、微小切れ刃の切削面積に比例するものとして取り扱う。しかしながら、切削力の計算に工具変形を考慮せずに行う。工具全体に作用する切削力は、力の方向を考慮しながら全ての微小要素に作用する切削力を足し合わせることによって求められる。また、工具の回転角を変化させながら切削力を計算していくと、加工中の瞬間切削力求められる。このモデルを用いれば、上向き切削や下向き切削、軸方向および半径方向切込みの違いによる切削力波形の違いも予測することが可能である。

3 番目のモデルは、2 番目のモデルで推定される切削力を基に、加工面を生成する切れ刃稜の位置と工具変形を考慮しながら加工誤差の推定を行う。ただし、工具変形は切削力に比例するものと仮定し、慣性の影響は考慮せずに推定を行う。

本研究で用いた切削加工モデルの詳細は、次節以降で説明していく。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 4. 2 瞬間切削力モデル

スクエアエンドミルによる加工を推定するために使用した切削加工モデルを図 3.4.1 に示す[3-15]. 切削力の計算を行うために, エンドミルを薄板要素に分解し, 個々の薄板要素の切れ刃先端に微小切削力が作用していると仮定している. 工具回転角 θ において工具軸方向の微小要素における j 番目の切れ刃に作用する工具接線, 半径, 軸方向の力 dF_{tj} , dF_{rj} , dF_{aj} はそれぞれ次式のように表せる.

$$\begin{aligned} dF_{tj}(\theta, z) &= [K_{te} + K_{tc} \cdot h(\theta, z)] dz \\ dF_{rj}(\theta, z) &= [K_{re} + K_{rc} \cdot h(\theta, z)] dz \\ dF_{aj}(\theta, z) &= [K_{ae} + K_{ac} \cdot h(\theta, z)] dz \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

ここで, K_{te} , K_{re} , K_{ae} , K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} は実験より求められる切削係数である. 切削係数には, 単位長さあたりの切れ刃が被削材をこすることによって生じる摩擦力成分である K_{te} , K_{re} , K_{ae} (単位: N/mm) と, 単位面積あたりの被削材の除去に必要な切削力の成分である K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} (単位: N/mm²) の 2 種類がある. (切削係数の求め方については 3. 4. 6 節で説明) また, $h(\theta, z)$ は実切込み厚さ, dz は工具微小要素の軸方向の厚さである.

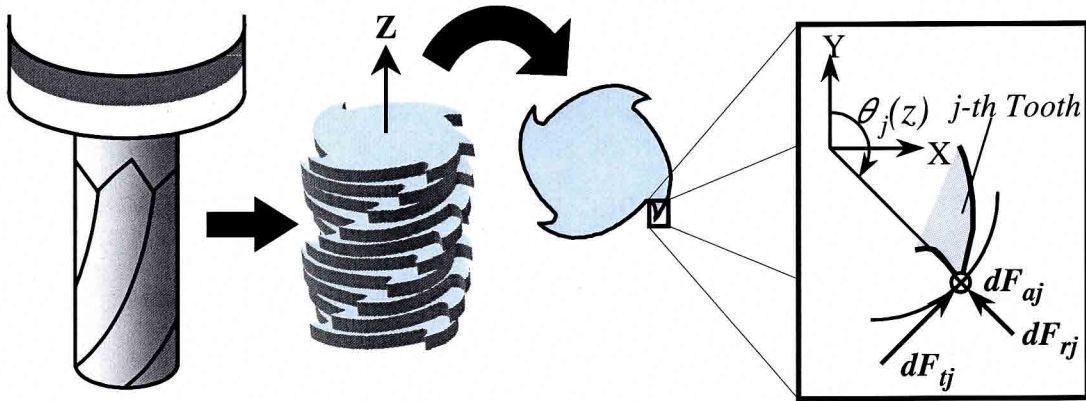


Fig.3.4.1 Cutting Rigid Force Model

さらに要素ごとの切削力を, 送り方向 x と工具軸方向 z , それらに垂直な方向 y に分解すると次のようになる.

$$\begin{aligned} dF_{xj}(\theta, z) &= -dF_{tj}(\theta, z) \cos \theta_j(z) - dF_{rj}(\theta, z) \sin \theta_j(z) \\ dF_{yj}(\theta, z) &= dF_{tj}(\theta, z) \sin \theta_j(z) - dF_{rj}(\theta, z) \cos \theta_j(z) \\ dF_{zj}(\theta, z) &= -dF_{aj}(\theta, z) \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

切れ刃 j によって与えられる切削力は式 (3.4.1) を式 (3.4.2) に代入し、切れ刃 j の実切削領域に沿ってそれらを積分することにより与えられる。

$$F_{x_j}(\theta) = \int dF_{x_j}(\theta, z), F_{y_j}(\theta) = \int dF_{y_j}(\theta, z), F_{z_j}(\theta) = \int dF_{z_j}(\theta, z) \quad (3.4.3)$$

そして切削領域にあるすべての切れ刃によって与えられる切削力は、工具回転角 θ で工具に作用しているそれぞれの切れ刃の微小要素に作用する瞬間切削力の総計をとることで計算される。

$$F_x(\theta) = \sum_{j=0}^{N-1} F_{x_j}(\theta), F_y(\theta) = \sum_{j=0}^{N-1} F_{y_j}(\theta), F_z = \sum_{j=0}^{N-1} F_{z_j}(\theta) \quad (3.4.4)$$

ここで実切込み厚さ $h(\theta, z)$ について考えてみる。 $h(\theta, z)$ は、切削中の切れ刃の軌跡と直前に切削された加工面の工具半径方向の距離である。工具が変形しないと仮定すれば、工具中心が工具のたわみによって移動することはないので、切れ刃 j と切れ刃 $j-1$ の切れ刃の軌跡だけを考慮すれば良い。従って、このモデルでは刃先の軌跡は図 3.4.2 のようになるので、 $h(\theta, z)$ は次式で求められる。

$$h(\theta, z) = s_j \sin \theta_j(z) \quad (3.4.5)$$

ここで s_j は切れ刃 j の送り量、 $\theta_j(z)$ は切れ刃 j の工具軸方向の位置 z における回転角度である。これらは、次式のように表される。

$$s_j = \frac{Z \cdot s_t \cdot \theta_{pj}}{2\pi} \quad (3.4.6)$$

$$\theta_j(z) = \theta + \sum_{n=1}^{j-1} \theta_{pn} - k_i z, 0 < j < Z \quad (3.4.7)$$

式 (3.4.6) で Z は工具の刃数、 s_t は一刃当たりの送り量、 θ_{pj} は切れ刃 j と $j-1$ の間の角度（ピッチ角）である。また、式 (3.4.7) で θ は任意の切れ刃についての切れ刃先端 ($z=0$) を y 軸の正の方向から時計回りに測定した工具回転角である。 k_z は工具軸方向の位置 z における工具回転角の遅れ角に相当し、 $k_i = \tan i / R$ である。ここで、 i はねじれ角、 R は工具半径である。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

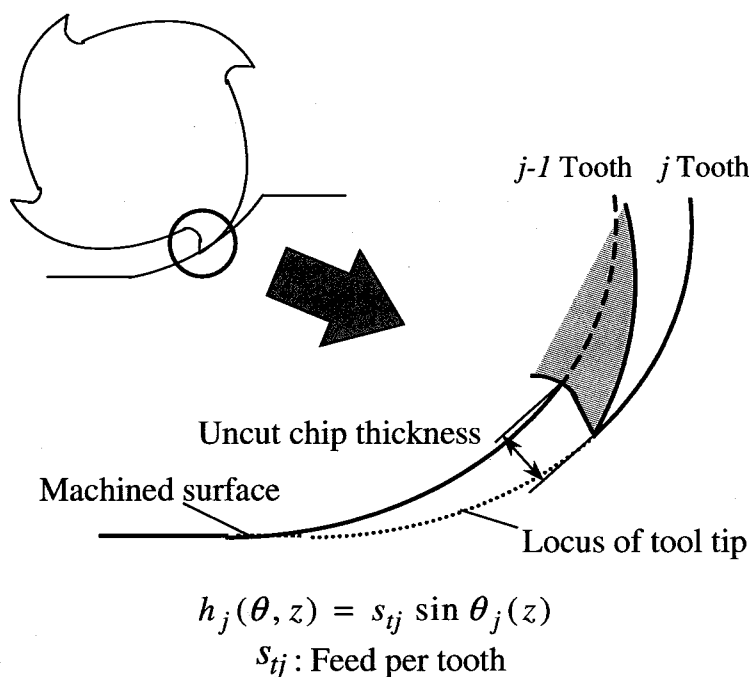


Fig.3.4.2 Uncut Chip Thickness

また、各薄板要素ごとの切れ刃の実切削領域について考える。実切削領域を角度回転角で表現することとした。図 3.4.3 は、上向き切削と下向き切削の場合の実切削領域をそれぞれ表している。ただし図における θ_{st} 、 θ_{en} はエンゲージアングル、デイスエンゲージアングルをそれぞれ表しており、図の幾何学的関係から求めると式 (3.4.8)、(3.4.9) で表現することが可能である。

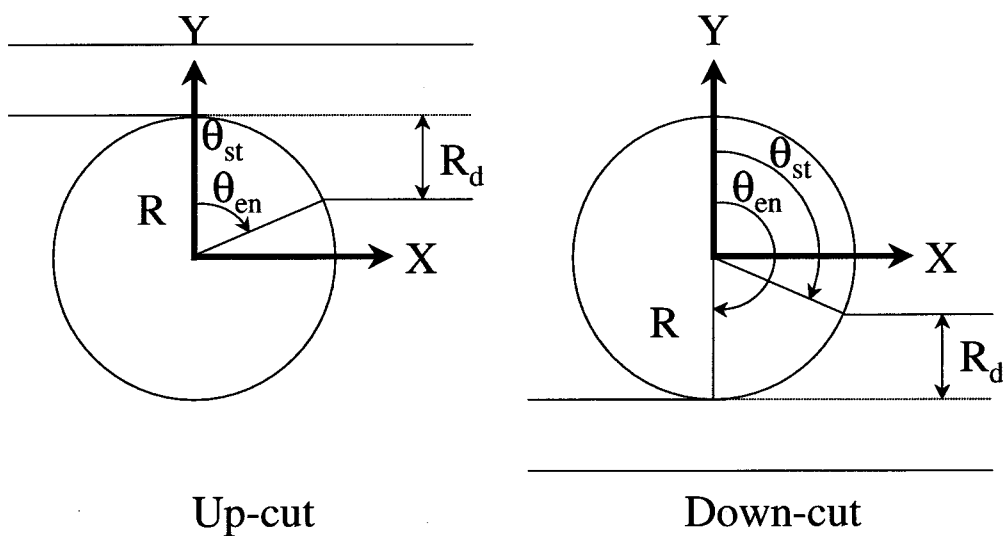


Fig.3.4.3 Geometric expression of cutting region

$$\theta_{st} = \begin{cases} 0 & \text{up - milling} \\ \pi/2 + \sin^{-1}((R - Rd)/R) & \text{down - milling} \end{cases} \quad (3.4.8)$$

$$\theta_{en} = \begin{cases} \pi/2 + \sin^{-1}((R - Rd)/R) & \text{up - milling} \\ \pi & \text{down - milling} \end{cases} \quad (3.4.9)$$

ここで式 (3.4.5) の実切入り厚さ $h(\theta, z)$ を式 (3.4.1) に代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} dF_{ij}(\theta, z) &= [K_{te} + K_{tc} \cdot s_{ij} \sin \theta_j(z)] dz \\ dF_{rj}(\theta, z) &= [K_{re} + K_{rc} \cdot s_{ij} \sin \theta_j(z)] dz \\ dF_{aj}(\theta, z) &= [K_{ae} + K_{ac} \cdot s_{ij} \sin \theta_j(z)] dz \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

式 (3.4.10) を式 (3.4.2) に代入し、式 (3.4.8) (3.4.9) によって求められるエンゲージアングルとデイスエンゲージアングルなどから求められる切削領域範囲内で積分することによって、工具変形を考慮しない場合の切れ刃 j の工具回転角 θ における瞬間切削力を計算することができる。

$$\begin{aligned} F_{xj}(\theta) &= \frac{R}{\tan i} [K_{te} \sin \theta_j(z) - K_{re} \cos \theta_j(z) \\ &\quad + \frac{s_{ij}}{4} \{K_{rc} (2\theta_j(z) - \sin 2\theta_j(z)) - K_{tc} \cos 2\theta_j(z)\}]_{z_{j,1}(\theta)}^{z_{j,2}(\theta)} \\ F_{yj}(\theta) &= -\frac{R}{\tan i} [-K_{re} \sin \theta_j(z) - K_{te} \cos \theta_j(z) \\ &\quad + \frac{s_{ij}}{4} \{K_{tc} (2\theta_j(z) - \sin 2\theta_j(z)) + K_{rc} \cos 2\theta_j(z)\}]_{z_{j,1}(\theta)}^{z_{j,2}(\theta)} \\ F_{zj}(\theta) &= \frac{R}{\tan i} [K_{ae} \theta_j(z) - s_{ij} K_{ac} \cos \theta_j(z)]_{z_{j,1}(\theta)}^{z_{j,2}(\theta)} \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

式 (3.4.11) を式 (3.4.4) のように総計をとることによって、工具回転角 θ における工具に作用する切削力を計算することができる。また切削トルクは、接線方向の切削力 F_t に工具半径を掛けることによって求めることができる。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 4. 3 工具の変形モデル

加工誤差は、エンドミルのたわみが加工面に転写されて生成されると仮定する。そこで工具一回転中の切削力によって生じる工具側の変形量から推定を試みる。本節ではまず、エンドミルのたわみの計算方法について述べていく。まずエンドミルは図 3.4.4 の左図のように線形バネとねじれバネを持つ工具ホルダに取り付けた片持ちばりとしてモデル化する。図 3.4.4 の右図における δ と ϕ はエンドミルと工具ホルダとの境界で生じるバネ変位による並進と傾きを表している。 δ と ϕ の数学的モデルは次節で示す。エンドミルを軸方向に n 要素に分割して考えると、切れ刃 j による要素 k での切削力は式 (3.4.12) から導かれる。

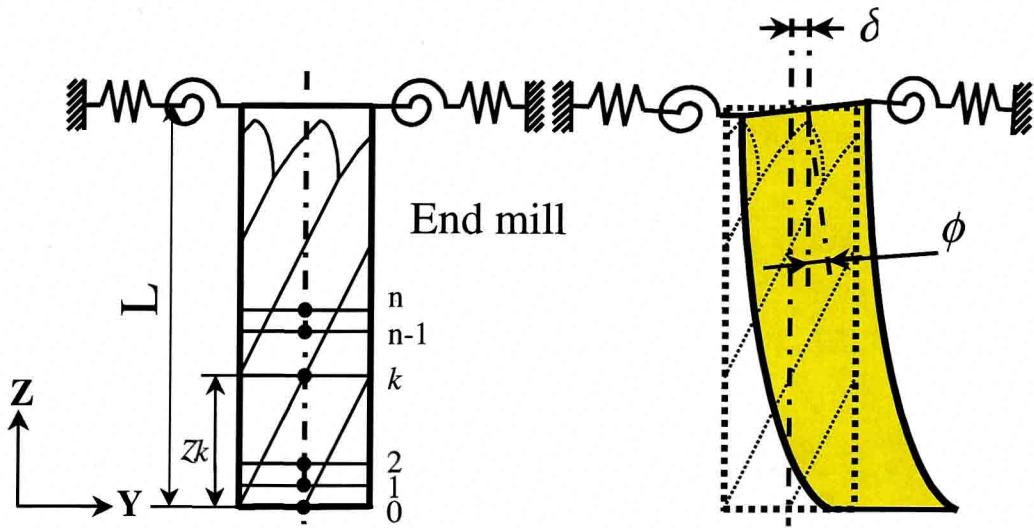


Fig.3.4.4 Static Deflection Model

$$\begin{aligned}
 \Delta F_{xj}(\theta) &= \frac{R}{\tan i} \left[K_{te} \sin \theta_j(z) - K_{re} \cos \theta_j(z) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{s_{ij}}{4} \left\{ K_{rc} (2\theta_j(z) - \sin 2\theta_j(z)) - K_{tc} \cos 2\theta_j(z) \right\} \right]_{z_k}^{z_{k+1}} \\
 \Delta F_{yj}(\theta) &= -\frac{R}{\tan i} \left[-K_{re} \sin \theta_j(z) - K_{te} \cos \theta_j(z) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{s_{ij}}{4} \left\{ K_{tc} (2\theta_j(z) - \sin 2\theta_j(z)) + K_{rc} \cos 2\theta_j(z) \right\} \right]_{z_k}^{z_{k+1}}
 \end{aligned} \tag{3.4.12}$$

z_k, z_{k+1} は微小要素 k の下方と上方の z 軸の境界を表す。要素ごとの切削力は要素 k の節点 k に作用する。節点 l に作用する力によって節点 k における y 方向のたわみは、片持ちばりのたわみで表される[3-16].

$$\delta_y(k,l) = \begin{cases} \frac{\Delta F_{y,l} v_k^2}{6E_E I_E} (3v_l - v_k) + \delta_{sp,y}(k,l), & 0 < v_k < v_l \\ \frac{\Delta F_{y,l} v_l^2}{6E_E I_E} (3v_k - v_l) + \delta_{sp,y}(k,l), & v_l < v_k \end{cases} \quad (3.4.13)$$

ここで $v_k = L_E - z_k$, E_E は工具のヤング率, I_E は工具の断面 2 次モーメントである。 $\delta_{sp,y}(k,l)$ は節点 k での y 方向のたわみであり, 次節でモデル化されるスピンドル・工具ホルダ・コレットのたわみによって求められる。工具の断面二次モーメントは, 刃みぞによる断面積の損失を考慮して $R_e = 0.8R$ の等価半径を用いて計算する[3-17]。 x 方向のたわみも同様に求められる。従って加工面上の誤差は, 次式のように節点 k でのすべての節点力によって生じるたわみの重ね合わせとして評価される。

$$\delta_x(k) = \sum_0^n \delta_x(k,l), \quad \delta_y(k) = \sum_0^n \delta_y(k,l) \quad (3.4.14)$$

3. 4. 4 工具ホルダの変形モデル

スピンドル・工具ホルダ・コレットの静的なたわみモデルを図 3.4.5 に示す。このモデルのたわみは, エンドミルに作用する切削力によって生じる並進と傾きによって表される。ここでは簡単のために, スピンドル・工具ホルダ・コレットといった全ての構成要素の並進と傾きを一括して δ_H, ϕ_H とする。集中荷重 W がエンドミルの先端に加わる時, そこでのたわみの総計を δ_{total} は次のように表される。

$$\delta_{total} = \delta_H + \phi_H L_E + \delta_E \quad (3.4.15)$$

ここで図 3.4.5 のように, 構成要素の剛性係数を決定するためにエンドミルの先端に集中荷重 W をかけたときにホルダ端面のたわみ δ_A , エンドミル中間点でのたわみ δ_B , エンドミル先端のたわみ δ_C を A, B, C 各点で測定する。

測定されるたわみは, 次式のように表される。

$$\begin{aligned} \delta_A &= \delta_H \\ \delta_B &= \delta_H + \frac{L_E}{2} \tan \phi_H + \delta_{E,B} \\ \delta_C &= \delta_H + L_E \tan \phi_H + \delta_{E,C} \end{aligned} \quad (3.4.16)$$

ここで, $\delta_{E,B}$ は B 点でのエンドミルのたわみ, $\delta_{E,C}$ は C 点でのエンドミルのたわみである。ま

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

た、構成要素の線形バネ係数、ねじれバネ係数を k_H, Ω_H とすると次のようになる。

$$\begin{aligned} W &= k_H \delta_H \\ WL_E &= \Omega_H \phi_H \end{aligned} \quad (3.4.17)$$

また、 ϕ_H は微少なので $\tan \phi_H = \sin \phi_H = \phi_H$ とみなせる。また、 $\delta_{E,B}, \delta_{E,C}$ はエンドミルのたわみなのでエンドミルを片持ちばりと考えると、

$$\delta_{E,B} = \frac{5L_E^3}{48EI} W, \quad \delta_{E,C} = \frac{L_E^3}{3EI} W \text{ より}$$

$$\delta_{E,B} = \frac{5}{16} \delta_{E,C} \quad (3.4.18)$$

と表せる。よって式 (3.4.16) は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \delta_A &= \delta_H = \frac{W}{k_H} \\ \delta_B &= \delta_H + \frac{L_E}{2} \phi_H + \delta_{E,B} = \frac{W}{k_H} + \frac{L_E^2}{2\Omega_H} W + \frac{5}{16} \delta_{E,C} \\ \delta_C &= \delta_H + L_E \phi_H + \delta_{E,C} = \frac{W}{k_H} + \frac{L_E^2}{\Omega_H} W + \delta_{E,C} \end{aligned} \quad (3.4.19)$$

式 (3.4.19) より、

$$\begin{aligned} \delta_A &= \frac{1}{k_H} W \\ \delta_{BC} &= 16\delta_B - 5\delta_C = \left(\frac{11}{k_H} + \frac{3L_E^2}{\Omega_H} \right) W \end{aligned} \quad (3.4.20)$$

式 (3.4.20) より、 W を変えながら δ_A, δ_{BC} を W に対してプロットして線形近似することで、 δ_A を線形近似した時の傾き a_A 、 δ_{BC} を線形近似したときの傾き a_{BC} から k_H, Ω_H が式 (3.4.21) のように求められる。

$$a_A = \frac{1}{k_H} \Rightarrow k_H = \frac{1}{a_A} \quad (3.4.21)$$

$$a_{BC} = \left(11a_A + \frac{3L_E^2}{\Omega_H} \right) \Rightarrow \Omega_H = \frac{3L_E^2}{a_{BC} - 11a_A}$$

バネ係数 k_H , Ω_H が求められると、スピンドル・工具ホルダ・コレットのたわみ $\delta_{sp,y}(k, l)$ は式 (3.4.22) のように求められる。

$$\delta_{sp,y}(k, l) = \frac{\Delta F_{y,l}}{W} [\delta_H + (L_E - z_k)\phi_H]$$

$$= \Delta F_{y,l} \left[\frac{1}{k_H} + (L_E - z_k) \frac{(L_E - z_l)}{\Omega_H} \right] \quad (3.4.22)$$

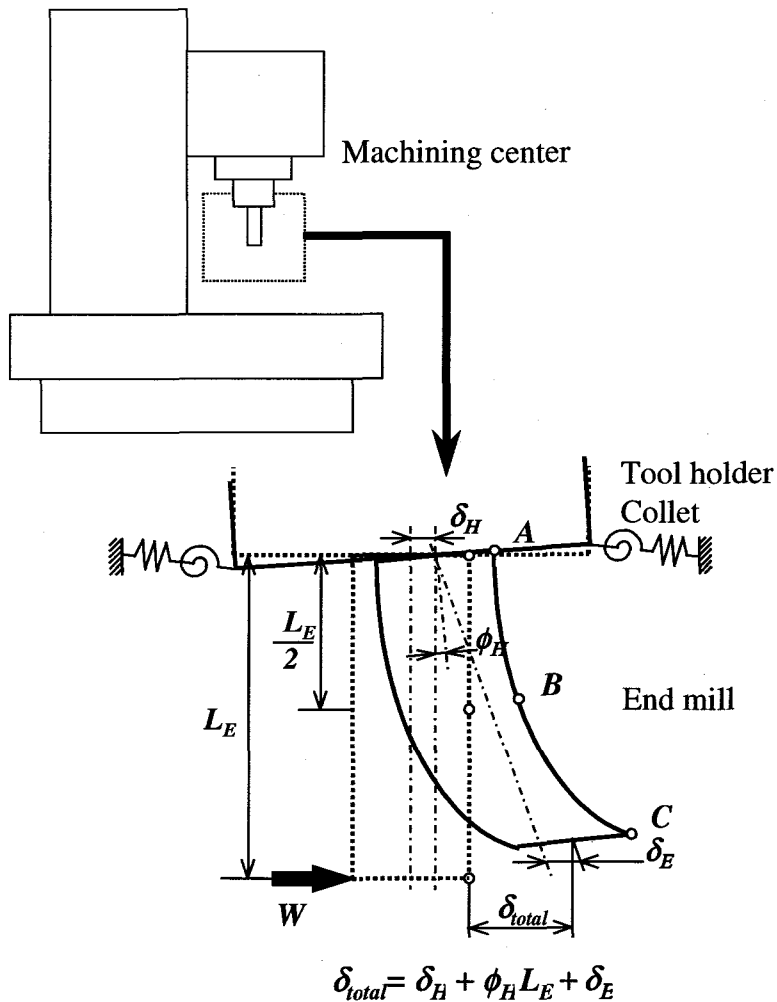


Fig.3.4.5 Tool Stiffness Model

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 4. 5 工具および工具ホルダの変形と加工誤差

加工誤差は図 3.4.6 の○印に示されるように、切れ刃が加工面と交差する点で生成される。工具側の変形は、3. 4. 2 節で説明した周期的な切削力によって変化する。従って、切れ刃が加工誤差生成点（切れ刃と加工面の交点）にある時の変形量から加工誤差を求めなければならない。

加工誤差生成点は幾何学的な関係から、瞬間の工具回転角が上向き切削で 0、下向き切削で π となる。

$$\theta_j = \theta + \sum_{n=0}^{j-1} \theta_{pn} - k_i z = \begin{cases} 0 & \text{up - milling} \\ \pi & \text{down - milling} \end{cases} \quad (3.4.23)$$

軸方向での切れ刃と加工面の交差 $z_j(\theta)$ は、式 (3.4.23) から工具回転角 θ によって決定することができる。

$$z_j(\theta) = \frac{\theta + \sum_{n=0}^{j-1} \theta_{pn}}{k_i} \quad \text{up - milling} \quad (3.4.24)$$

$$z_j(\theta) = \frac{\theta + \sum_{n=0}^{j-1} \theta_{pn} - \pi}{k_i} \quad \text{down - milling}$$

切削加工の幾何学的な条件によっては、複数の切れ刃が加工面を生成するが、すべての交点は、式 (3.4.24) から決定される。節点 k では、 y 方向の工具たわみ $\delta_y(k)$ は $z_k = z_j(\theta)$ が満たされるとき、切れ刃ごとの加工誤差 $e_j(k)$ として加工面上に転写される。

$$e_j(k) = \delta_y(k) \quad (3.4.25)$$

軸方向に沿った加工面の誤差曲線は、各節点で生じる切れ刃ごとの加工誤差を比較し、決定していくことで推定可能である。

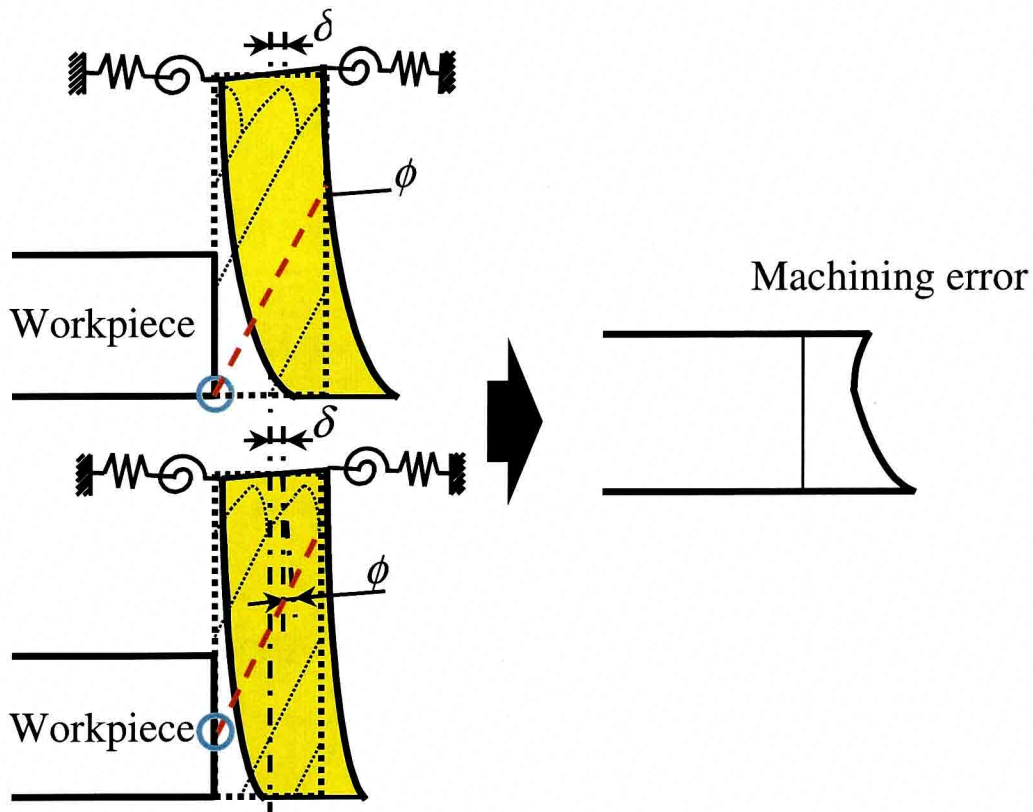


Fig. 3.4.6 Calculation Method of Machining Error

3. 4. 6 切削係数の導出

切削係数は、実験より求められた平均切削力 \bar{F}_x , \bar{F}_y , \bar{F}_z を送り量に対して線形近似したものと、切削モデルの平均切削力を比較して求める。

まず、実験から x , y , z 方向の平均切削力 \bar{F}_x , \bar{F}_y , \bar{F}_z を求める。

$$\bar{F}_x = \frac{\sum_{n=1}^{N_d} F_{xn}}{N_d} \quad (3.4.26)$$

ここで、 N_d はデータ点数である。実験ではばらつきがあるので、工具 10 回転以上のデータを平均するのが望ましい。また、整数回転分のデータとする。1 回転当たりのデータ点数 N_s とサンプリング周波数 f_s [Hz]、主軸回転数 N [rpm] の関係は次式の通りである。

$$N_s = \frac{60f_s}{N} \quad (3.4.27)$$

よって、データ点数 N_d は 1 回転当たりのデータ点数 N_s の整数倍となる。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

この平均切削力 $\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z$ を 1 刃当たりの送りを変化させながらプロットし線形近似する。すると線形近似した傾きと切片より、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\bar{F}_x &= \bar{F}_{xc} \cdot s_t + \bar{F}_{xe} \\ \bar{F}_y &= \bar{F}_{yc} \cdot s_t + \bar{F}_{ye} \\ \bar{F}_z &= \bar{F}_{zc} \cdot s_t + \bar{F}_{ze}\end{aligned}\tag{3.4.28}$$

一方、切削加工モデルの式 (3.4.11) から平均切削力を求めることができる。式 (3.4.11) を式 (3.4.4) に代入し切れ刃の総計をとり、工具回転角 θ について積分して工具 1 回転の角度 2π で割ることにより求められる。

$$\begin{aligned}\bar{F}_x &= \frac{1}{2\pi} \cdot Z \cdot (-k_i A_d) \cdot \frac{R}{\tan i} \left[K_{te} \sin \theta - K_{re} \cos \theta + \frac{s_t}{4} \{ K_{rc} (2\theta - \sin 2\theta) - K_{tc} \cos 2\theta \} \right]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \\ &= \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} \left\{ -K_{te} [\sin \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} + K_{re} [\cos \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} + \frac{s_t}{4} (K_{tc} [\cos 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} - K_{rc} [2\theta - \sin 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}) \right\} \\ \bar{F}_y &= \frac{1}{2\pi} \cdot Z \cdot (-k_i A_d) \cdot -\frac{R}{\tan i} \left[-K_{re} \sin \theta - K_{te} \cos \theta + \frac{s_t}{4} \{ K_{tc} (2\theta - \sin 2\theta) - K_{rc} \cos 2\theta \} \right]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \\ &= \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} \left\{ -K_{te} [\cos \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} - K_{re} [\sin \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} + \frac{s_t}{4} (K_{tc} [2\theta - \sin 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} + K_{rc} [\cos 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}) \right\} \\ \bar{F}_z &= \frac{1}{2\pi} \cdot Z \cdot (-k_i A_d) \cdot \frac{R}{\tan i} [K_{ae} \theta - s_t K_{ac} \cos \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \\ &= -\frac{Z \cdot A_d}{2\pi} \{ K_{ae} (\theta_{ex} - \theta_{st}) - s_t K_{ac} [\cos \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \}\end{aligned}\tag{3.4.29}$$

ここで、

$$\begin{aligned}P &= \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} [\cos 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}, Q = \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} [2\theta - \sin 2\theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} \\ S &= \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} [\sin \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}, T = \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} [\cos \theta]_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}}\end{aligned}\tag{3.4.30}$$

とおくと、

$$\begin{aligned}
 \bar{F}_x &= -K_{te}S + K_{re}T + \frac{S_t}{4}(K_{tc}P - K_{rc}Q) \\
 \bar{F}_y &= -K_{te}T - K_{re}S + \frac{S_t}{4}(K_{tc}Q + K_{rc}P) \\
 \bar{F}_z &= -K_{ae} \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} (\theta_{ex} - \theta_{st}) + S_t K_{ac}T
 \end{aligned} \tag{3.4.31}$$

となる。切削モデルから得られる式 (3.4.31) の係数を実験値から得られる式 (3.4.26) の係数と比較することによって次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \bar{F}_{xe} &= -K_{te}S + K_{re}T, \bar{F}_{xc} = \frac{(K_{tc}P - K_{rc}Q)}{4} \\
 \bar{F}_{ye} &= -K_{te}T - K_{re}S, \bar{F}_{yc} = \frac{(K_{tc}Q + K_{rc}P)}{4} \\
 \bar{F}_{ze} &= -K_{ae} \frac{Z \cdot A_d}{2\pi} (\theta_{ex} - \theta_{st}), \bar{F}_{zc} = K_{ac}T
 \end{aligned} \tag{3.4.32}$$

式 (3.4.32) より,

$$\begin{aligned}
 K_{te} &= -\frac{S\bar{F}_{xe} + T\bar{F}_{ye}}{S^2 + T^2}, K_{tc} = \frac{4(P\bar{F}_{xc} + Q\bar{F}_{yc})}{P^2 + Q^2}, \\
 K_{re} &= \frac{K_{te}S + \bar{F}_{xe}}{T}, K_{rc} = \frac{K_{tc}P - 4\bar{F}_{xc}}{Q}, \\
 K_{ae} &= \frac{2\pi}{Z \cdot A_d} \frac{-\bar{F}_{ze}}{(\theta_{ex} - \theta_{st})}, K_{ac} = \frac{\bar{F}_{zc}}{T}
 \end{aligned} \tag{3.4.33}$$

式 (3.4.33) に、実験値の平均切削力を線形近似して求めた $\bar{F}_{xe}, \bar{F}_{xc}, \bar{F}_{ye}, \bar{F}_{yc}, \bar{F}_{ze}, \bar{F}_{zc}$ を代入して切削係数 $K_{te}, K_{re}, K_{ae}, K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}$ を求めることができる。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 4. 7 切削モデルの検証

切削力

図 3.4.7 に切削実験により求められた切削力と 3. 4. 1 節で説明した式を基に推定した切削力を示す。実験条件は表 3.4.1 の通りである。またシミュレーションで用いた切削係数は表 3.4.2 の通りである。図において横軸は、工具の回転角 (0~360 度) を表し、縦軸は切削力の大きさを表している。

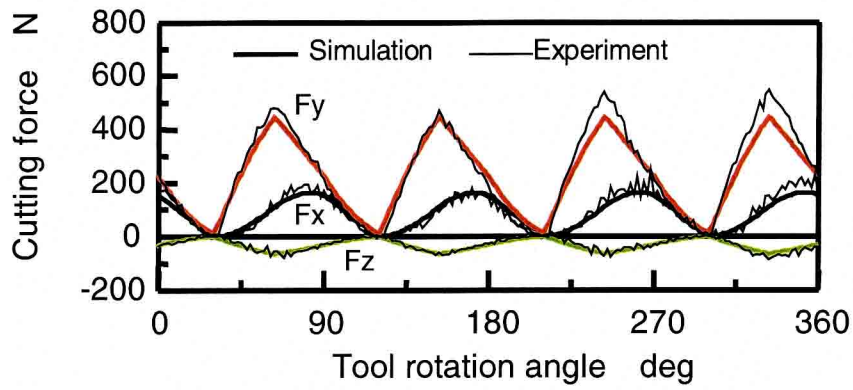
図からも明らかなように、シミュレーション結果は実験結果と良く一致しているといつてよい。この事から、本研究で用いた切削力の推定手法は妥当であると考えられる。

Table 3.4.1 Experimental Cutting Conditions

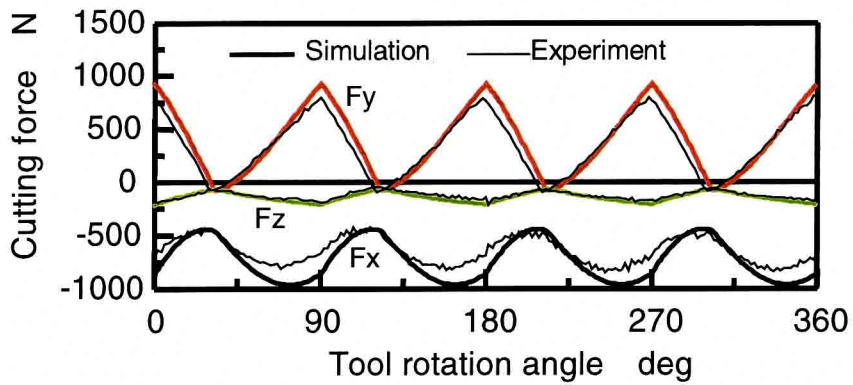
Machining Center	FX-1 (Vertical type)	
Flat end mill	Material	HSS
	Number of flutes	4
	Diameter	20mm
	Helical angle	30deg.
Workpiece	S55C (Medium carbon steel)	
Cutting Conditions	Cutting type	(a)Down cut, (b)Up cut, (c)Down cut
	Axial depth of cut	(a)5mm, (b)10mm, (c)10mm
	Radial depth of cut	(a)10mm, (b)10mm, (c)10mm
	Feed per tooth	(a)0.02mm, (b)0.05mm, (c)0.1mm

Table 3.4.2 Cutting Coefficients

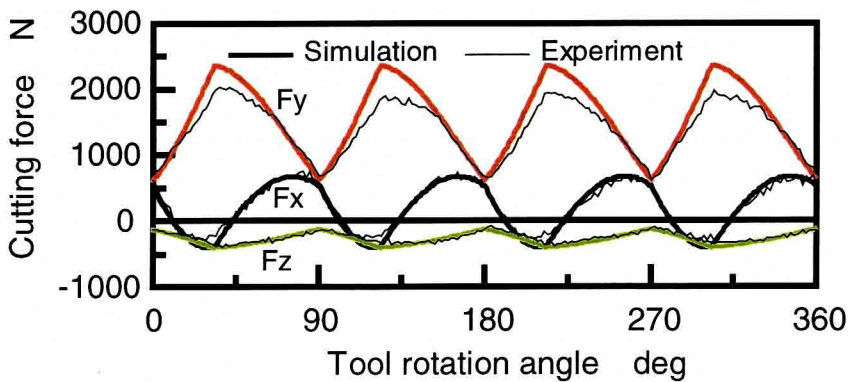
	Tangential direction	Radial direction	Axial direction
Cutting force [N/mm ²]	2587.554	1064.0	575.587
Edge force [N/mm]	15.914	12.872	2.386



(a) $R_d=5.0\text{mm}$, $A_d=10.0\text{mm}$, $s_t=0.02\text{mm/tooth}$, down cut



(b) $R_d=10.0\text{mm}$, $A_d=10.0\text{mm}$, $s_t=0.05\text{mm/tooth}$, up cut



(c) $R_d=10.0\text{mm}$, $A_d=10.0\text{mm}$, $s_t=0.1\text{mm/tooth}$, down cut

Tool: HSS flat end mill with 20mm diameter, 4flutes, 30 deg. helical angle

Workpiece: Medium carbon steel S55C (0.55% carbon)

Fig.3.4.7 Cutting Force in Various Cutting Conditions

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

加工誤差

3.4.2～3.4.4節で説明したモデルを基に推定した加工誤差を図 3.4.8 に示す。実験条件は、表 3.4.3 の通りで、シミュレーションで用いた剛性係数は表 3.4.4 の通りである。図において、横軸は加工面上の工具軸方向に沿った位置を表し、縦軸は加工面からの誤差を表しており、+値が削り残しを-値が削りすぎを意味している。

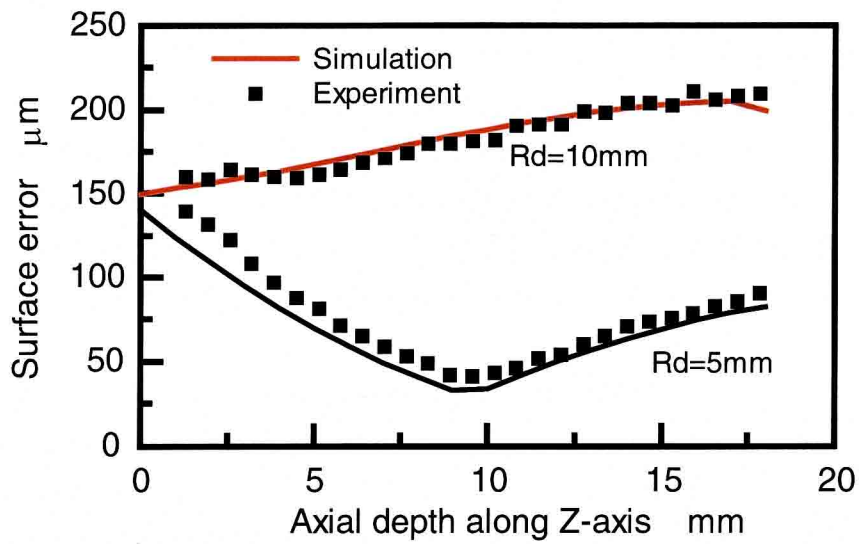
図からも明らかなように、シミュレーション結果と実験結果は良く一致しているといつてよい。この事から、本研究で用いた加工誤差の推定手法も妥当であることが示された。

Table 3.4.3 Experimental Cutting Conditions

Machining Center	FX-1 (Vertical type)	
Flat end mill	Material	HSS
	Number of flutes	4
	Diameter	20mm
	Helical angle	30deg.
Workpiece	Aluminum (A7075)	
Cutting Conditions	Cutting type	Down cut
	Axial depth of cut	18mm
	Radial depth of cut	5mm, 10mm
	Feed per tooth	0.1mm/tooth

Table 3.4.4 Stiffness Coefficients

	k_H [N/mm]	Ω_H [N/mm]
x	1.557×10^4	1.091×10^8
y	1.777×10^4	4.156×10^8



Cutting conditions: $R_d=5\text{mm}$, 10.0mm , $A_d=18.0\text{mm}$, $s_r=0.1\text{mm/tooth}$, down cut

Tool: HSS flat end mill with 20mm diameter, 4flutes, 30 deg. helical angle

Workpiece: Aluminum alloy A7075

Fig.3.4.8 Machining Error in Different Depth of Cuts

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 5 モデル参照による切削条件の修正

本節では、工作機械の自律化・知能化を実現するために非常に重要である「加工予測」に相当する VMSim を用いて、切削条件を修正する手法について述べていく。具体的には、予測可能な切削力と加工誤差の情報から、加工中の送り速度をきめ細かく変化させることによって、予め設定された切削力や加工誤差の上限値を超えないような加工を実現できるように修正を行う。本研究の目的は、自律加工の実現であるので、実時間で工具経路を生成しなければならないが、ここではまず切削条件の修正を行う機能の確認をするために NC プログラムを入力して、その NC プログラムの修正を行っていく。

3. 5. 1 NC プログラムシミュレータ

まず NC プログラムを解釈して工具経路を算出する NC プログラムシミュレータについて説明する。NC プログラムは、NC 工作機械を制御する際に用いられる指令群である。標準的な NC コードについては、JIS に個々の指令の意味や表記方式が定められているが[3-18]、中には機能拡張のために制御装置や工作機械に依存するものがある。本研究で作成した NC プログラムシミュレータは、表 3.5.1、表 3.5.2 に示すような NC コード[3-19]を解釈できるようになっている。

Table 3.5.1 Preparatory Functions

Code	Function	Code	Function
G00	Rapid traverse	G01	Linear interpolation
G02	Circular interpolation clockwise	G03	Circular interpolation counterclockwise
G04	Dwell	G17	X-Y plane selection
G18	X-Z plane selection	G19	Y-Z plane selection
G53	Machine coordinate system setting	G90	Absolute positioning mode
G91	Incremental positioning mode	G92	Offset of reference point

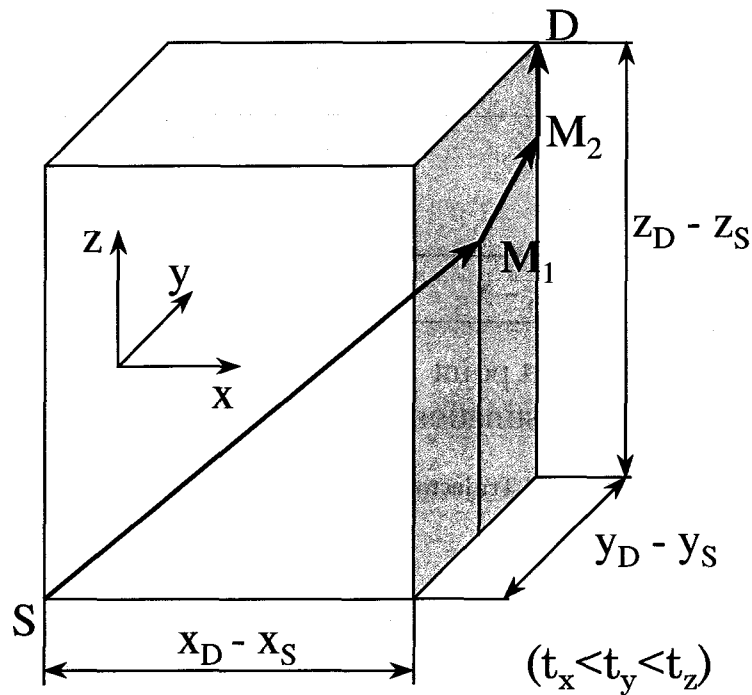
Table 3.5.2 Miscellaneous and Other Functions

Code	Function	Code	Function
M00	Program stop	M03	Spindle on
M05	Spindle off	M06	Tool change
M30	End of program	F	Feed rate
I	Definition of x-axis arc center	J	Definition of y-axis arc center
K	Definition of z-axis arc center	P	Period of dwell time
R	Arc radius	S	Spindle speed
T	Tool address	X	X-axis designation
Y	Y-axis designation	Z	Z-axis designation

NC プログラムシミュレータは計算機内で NC コードを 1 ブロックごとに解釈して、G00, G01, G02, G03 等の G コードなどに対応した工具経路を算出していく[3-20]。また F コードで指定されている送り速度の値を用いて、加工時間の算出を行えるようにした。

・早送り (G00)

早送りの場合、移動が各軸方向ごとに制御されているので、工具経路は図 3.5.1 に示すように、直線とはならず途中で屈曲する。すなわち x, y, z 各軸方向の移動時間の関係が $t_x < t_y < t_z$ である場合は、最初に x 軸方向の工具移動が終了し、次に y 軸方向、最後に z 軸方向の工具移動が終了する。各軸方向の移動時間と移動距離の関係から工具が通過する途中の座標を求めることができる。ただし、早送り速度は各軸独立に設定されており、その値は機械によって異なるので予め調べておく必要がある。



S: Start point
 D: Destination point
 M1, M2: Intermediate point

Fig.3.5.1 Trajectory of Rapid Traverse

・直線補間 (G01)

直線補間では送り速度を F コードで指定し、式 (3.5.1) のように全軸の合成速度 (工具の進行方向に対する接線速度) が指令値になるように制御する。この時、工具経路は図 3.5.2 に示すように直線となる。またその際の送り速度は次式のようになる。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.5.1)$$

ただし F_x, F_y, F_z は、各軸の送り速度である。

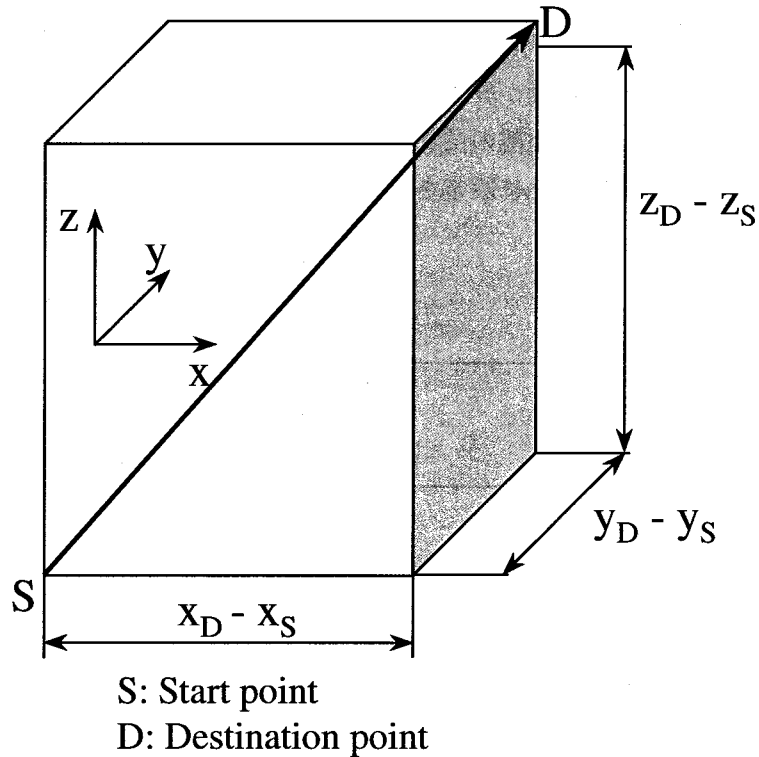


Fig.3.5.2 Trajectory of Linear Interpolation

・円弧補間 (G02, G03)

円弧補間では、予め G17, G18, G19 を用いて補間平面を決定して、F で指定された送り速度が円弧の接線速度となるように、指定した円弧に沿って工具が移動する。その時、円弧の中心と円弧の半径を指定する場合がある。

①円弧の中心を指定する場合

図 3.5.3 から分かるように開始角度とそこからの回転角度が解れば、工具経路の算出が可能となる。この時、円弧中心を (x_c, y_c) 、始点を (x_s, y_s) 、終点を (x_d, y_d) と表すと、開始角度 θ_0 と回転角度 θ は式 (3.5.2) より求められる。

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{y_s - y_c}{x_s - x_c}\right), \theta = \arctan\left(\frac{y_d - y_c}{x_d - x_c}\right) - \theta_0 \quad (3.5.2)$$

②円弧の半径を指定する場合

円弧中心を計算で求めてから、①と同様の処理を施し工具経路を算出する。始点を (x_s, y_s) 、終点を (x_d, y_d) 、円弧半径を R と表すと、幾何学的な関係から円弧中心 (x_c, y_c) は式 (3.5.3) より求めることができる。

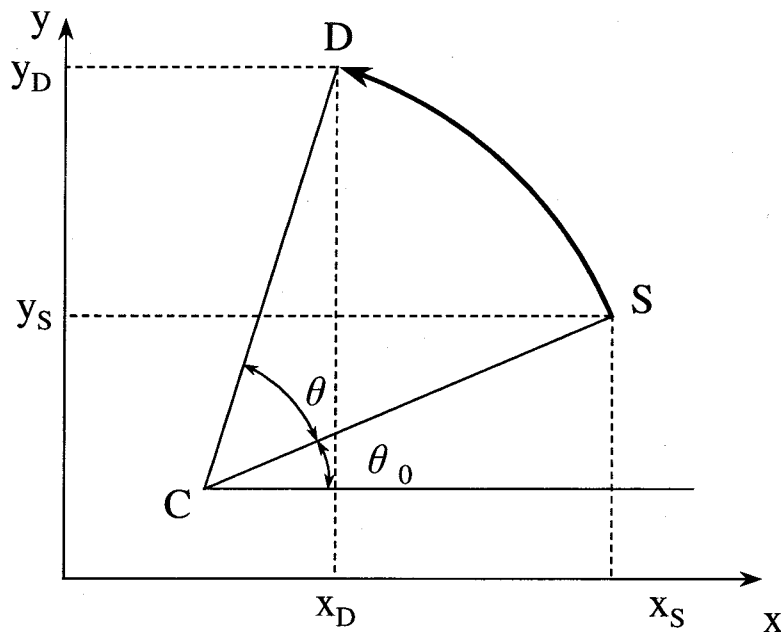
$x_s \neq x_d$ の時

$$x_c = \frac{x_s^2 - x_d^2 + y_s^2 - y_d^2 - 2(y_s - y_d)y_c}{2(x_s - x_d)} \tag{3.5.3}$$

$$y_c = \frac{y_s + y_d}{2} \pm \frac{x_s - x_d}{2} \sqrt{\frac{4R^2}{(x_s - x_d)^2 + (y_s - y_d)^2} - 1}$$

(+は G02, -は G03)

$x_s = x_d$ の時は、その中点を x_c とすればよい。



S: Start point
D: Destination point

Fig.3.5.3 Trajectory of Circular Interpolation

この NC プログラムシミュレータと形状シミュレータ、物理シミュレータを統合した VMSim のシステム構成を図 3.5.4 に示す。このシステムにより、表 3.5.1、表 3.5.2 で示されているコードを用いた NC プログラムの加工工程を予測することが可能となった。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

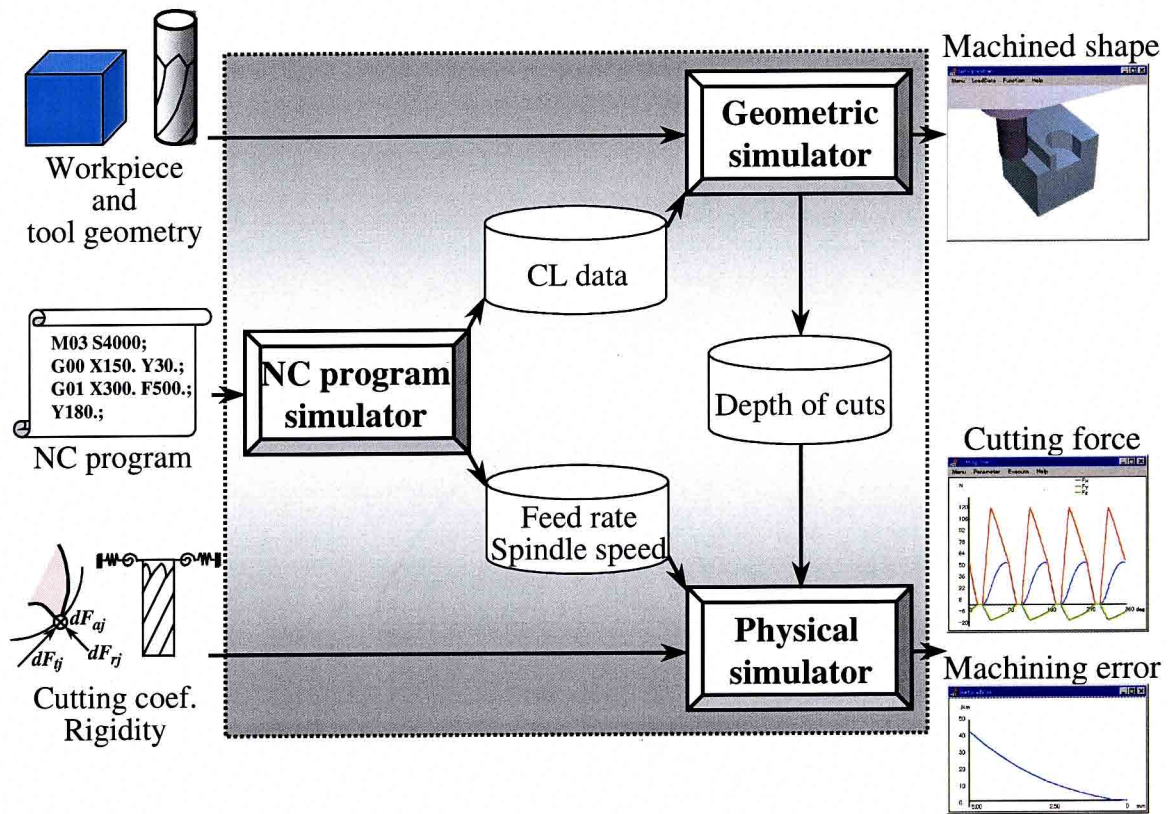


Fig.3.5.4 System Architecture of VMSim Integrating NC Program Simulator

3. 5. 2 切削係数導出実験

まず3. 4節で説明した切削力の推定に必要な切削係数を求める実験を3. 4. 5節で示した方法に従って行った。実験に使用した器材は以下の通りである。

- ・マシニングセンタ：立型マシニングセンタ (OKK 製, VM 4-II)
- ・工具：2枚刃超硬フラットエンドミル (KOBELCO 製, VC-2MS)
- ・動力計：水晶圧電式3成分動力計 (KISTLER 製, Type9257B)
- ・チャージアンプ：(KISTLER 製, Type5019A)
- ・データレコーダ：高密度多重 PCM 記録方式データレコーダ (TEAC 製, RD-125T)
- ・A/D 変換：(ナショナルインストラメンツ製, LabVIEW)

図 3.5.5 に示すように実験機材を配置した後に、実際にエンドミルで被削材を削って切削係数を求めていく。実験の流れは以下の通りである。

- (1)マシニングセンタにエンドミルと被削材を設置し、予め用意した NC プログラムを用いて加工を行う。
- (2)被削材が受ける切削力を動力計で検出し、チャージアンプで増幅した後に、データレコーダで DAT テープに記録する。
- (3)加工後に、パーソナルコンピュータ上で DAT テープに記録されたデータを A/D 変換して表計算ソフト (MS-Excel) を用いて解析を行い、切削係数を求める。

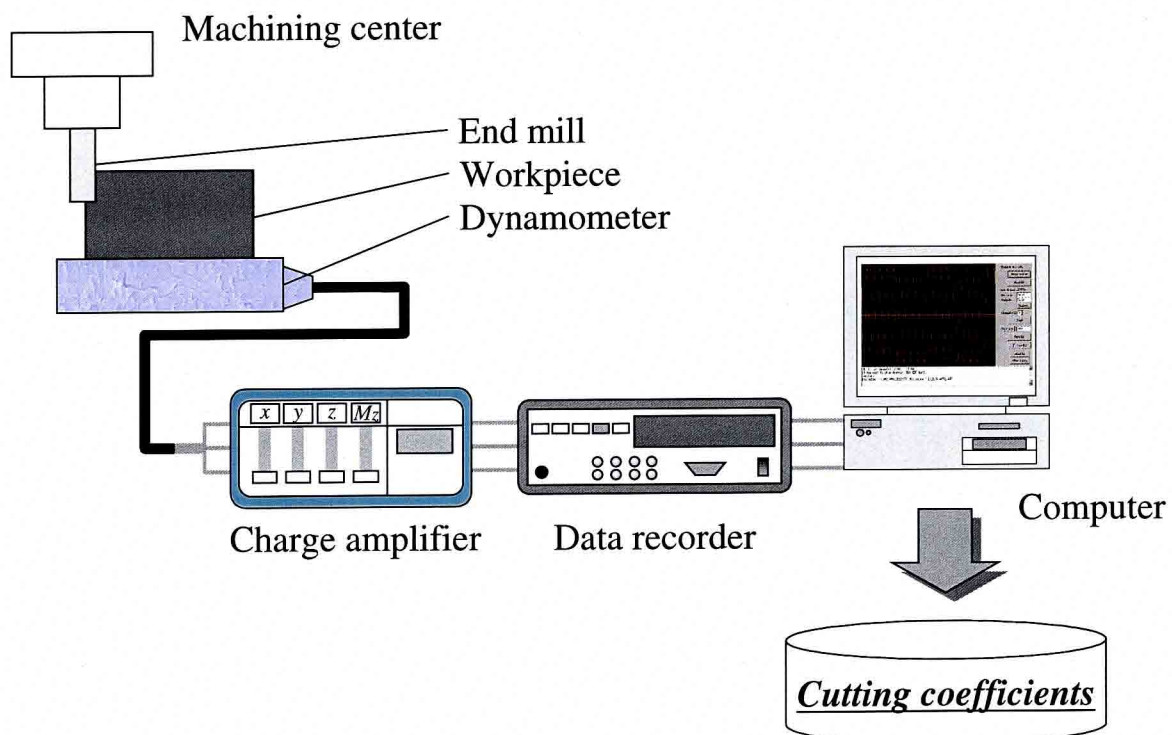


Fig.3.5.5 Experimental Procedure to Decide the Cutting Coefficients

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

表 3.5.3 に切削係数を求めるために使用した被削材と工具，実験条件を示す．また実験値から算出した平均切削力 F_x , F_y , F_z と，それらの一刃当たりの送りに対する回帰直線を図 3.5.6 に示す．図からも分かるように，得られた回帰直線は，送り速度の変化と共に増加する平均切削力を非常によく近似しているのが分かる．この回帰直線の傾きと切片から式(3.4.33)を用いて切削係数を求めていく．

ところで式(3.4.30)，(3.4.33)を見れば分かるように，切削係数を求めるためにはエンゲージアングルとデイスエンゲージアングルが必要である．これらは工具半径と半径方向切込みを基に，図 3.4.3 に示されている幾何学的関係から求めることが可能である．表 3.5.3 の各値を用いたところ，計算結果はエンゲージアングル $\theta_{st} = 2.214 \text{ rad}$ ，デイスエンゲージアングル $\theta_{en} = \pi \text{ rad}$ となった．従って，切削係数は表 3.5.4 に示すような値が得られた．次節以降，これらの切削係数を基に NC プログラムの評価と修正を行っていく．

Table 3.5.3 Experimental Cutting Conditions to Decide the Cutting Coefficient

Machining center	VM 4-II, OKK	
Workpiece	Cast iron	
End mill	Material	Carbide
	Number of flutes	2
	Diameter [mm]	10
	Helical angle [deg.]	30
Cutting conditions	Cutting direction	Down
	Radial depth of cut [mm]	2
	Axial depth of cut [mm]	10
	Spindle speed [rpm]	2500
	Feed per tooth [mm/tooth]	0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08

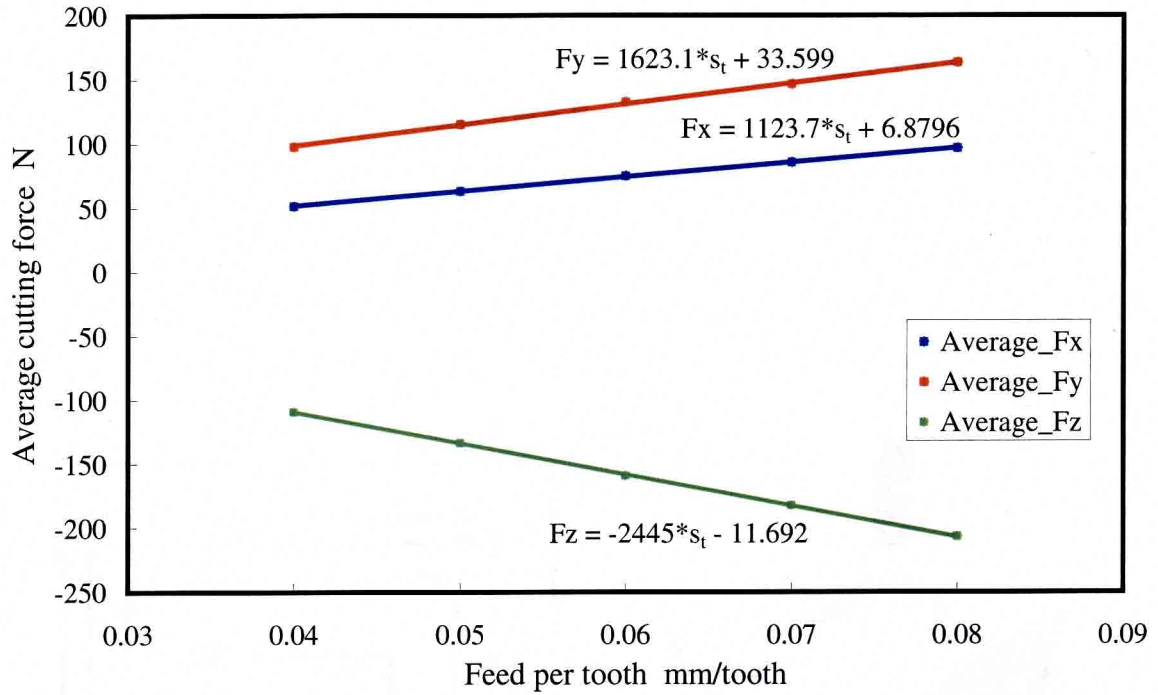


Fig. 3.5.6 Regression Lines (Average cutting force vs. Feed per tooth)

Table 3.5.4 Cutting Coefficients of Cast Iron

	Tangential direction	Radial direction	Axial direction
Cutting force [N/mm ²]	1489.37	552.556	1920.3
Edge force [N/mm]	7.439	9.475	3.961

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

3. 5. 3 VMSim による加工工程の評価と修正

非常に簡単な加工形状を対象に加工工程の評価を行う。対象となる NC プログラムは、図 3.5.7 に示すように、加工形状が(a)のようなキャビティ形状で、工具経路パターンは(b)に示すようなスクロールパターンである。なおシミュレーションをするにあたり被削材と工具は、前節と同じ鋳鉄と 2 枚刃の超硬スクエアエンドミルとしている。

この加工に関して切削力の最大値が 600N、最小値が-600N、加工誤差が $30\mu\text{m}$ 以下という要求があったとする。切削力は工具の切削能力や工作機械の剛性、取付具にかかっている力など様々な事柄に関連したパラメータであり、加工誤差は部品の加工精度に関連したパラメータである。これらは実際の加工においても考慮されるべき重要な評価項目であるが、現在はこれら进行评估するような市販の計算機支援ツールは存在しない。VMSim はこれらを効率的に評価することが可能な加工性評価技術と位置付けできる。

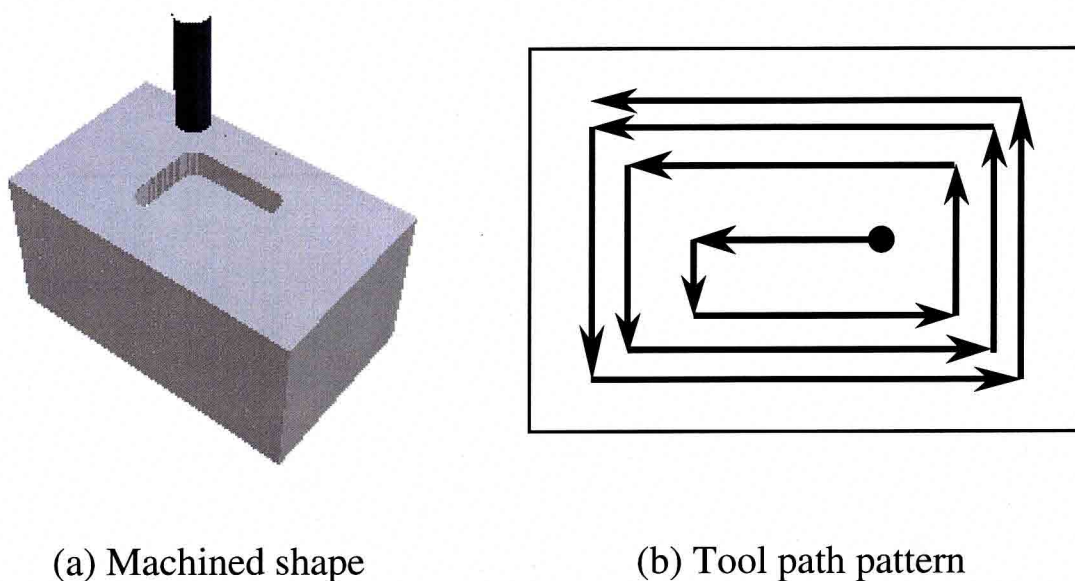
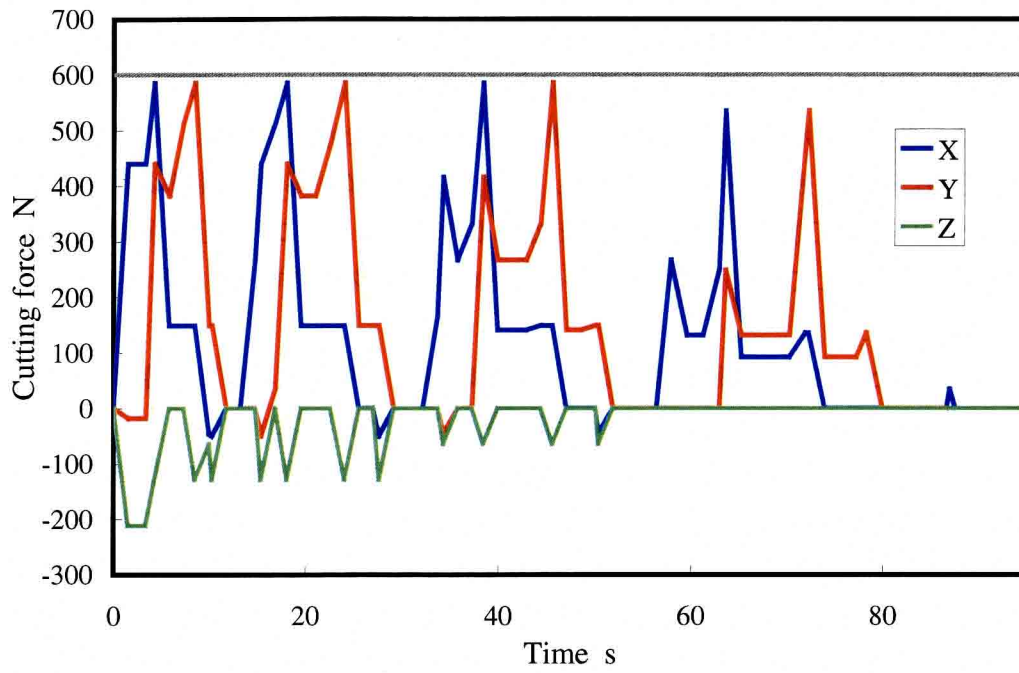


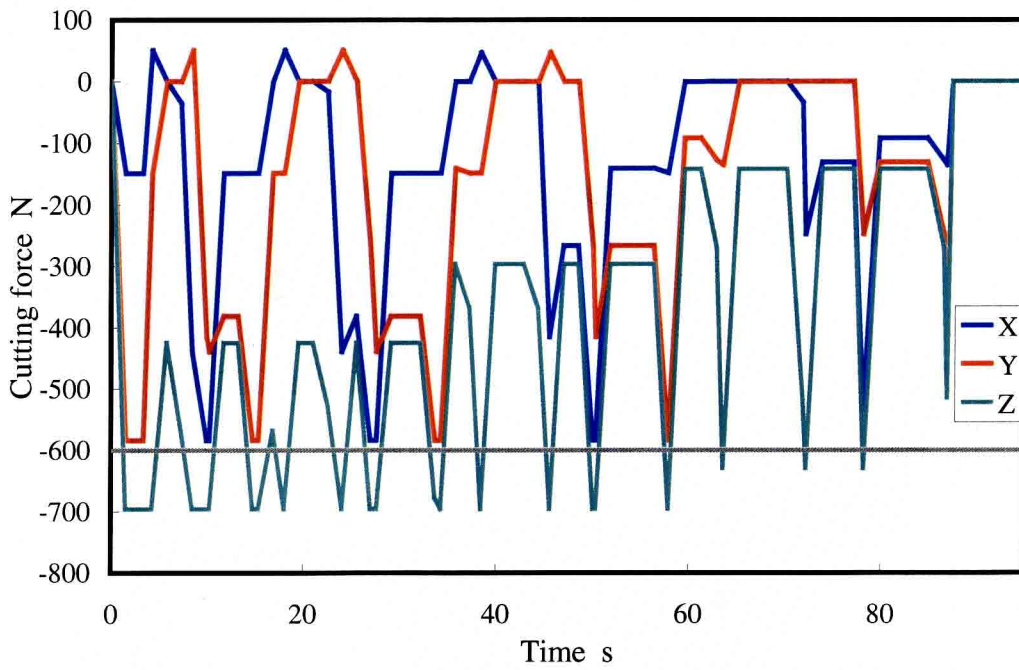
Fig.3.5.7 Machined Shape and Tool Path Pattern

VMSim による NC プログラムの評価結果を以下に示していく。図 3.5.8 (a)と(b)は、工作機械の XYZ 座標系に変換した時間に対する最大切削力と最小切削力の変化の様子をそれぞれ示している。図から分かるように、例題の NC プログラムによる加工は、最大切削力と最小切削力は共に許容値を超える場所が存在する。この時シミュレータは切削力に関して要求を満たしていない NC ブロックのブロック番号を記録しておくことが可能である。

また、推定される加工誤差の情報は最終加工面に関連付けられて記録されているので、図 3.5.9 に示すように、加工誤差が要求を満たすかどうかの判断をシミュレーション後に行うことができる。



(a) Maximum Cutting Forces



(b) Minimum Cutting Forces

Fig.3.5.8 Change of Estimated Cutting Force

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

図 3.5.9 には、最終加工面とその面を加工する NC ブロックが示されている。図は VMSim の実行画面から加工誤差を知りたい最終加工面を選択しているところで、画面の選択された面（図の円で囲まれた面）が表示され、画面の右にその部分を加工した NC ブロックが示されている。また図 3.5.10 には、選択された面における最小と最大の加工誤差を示している。図からも分かるように、最終加工面には削り残しが存在している。図(a)で示されている加工誤差はまだ余裕があるが、図(b)示されている加工誤差が $30\mu\text{m}$ を超えているのが分かる。この場合も同様に、シミュレータは、加工誤差に関して要求を満たしていない NC ブロックのブロック番号を記録しておくことが可能である。

このように開発した VMSim を利用すれば、加工前に NC プログラムを加工時間、切削力、加工誤差の観点から効率的に評価・検証することができることを示した。

本研究では、VMSim を工作機械の知能化を実現する技術として開発しているが、これまで説明してきたように現状の NC 加工に対しても利用可能である。すなわち、金型のような一品生産の場合での製作時間短縮の障害と言われる試し削り工程を省略することも可能になり、支援ツールとして非常に有効である。また熟練技術者が経験や技能、勘に基づいた定性的な評価による切削条件の決定も、数値情報として定量的に表すことができ、初心者が試行錯誤を繰り返して切削条件の決定が実現できるという点で、技能の伝承に役立つ計算機支援ツールの 1 つとして用いることもできる。さらに実際の加工中に、この VMSim の予測情報を用いれば、加工中の計測情報と比較することによって、加工トラブルの検出に用いることができる。従って開発した VMSim は、今後の製造技術を革新する極めて重要なシステムとして位置付けることができる。

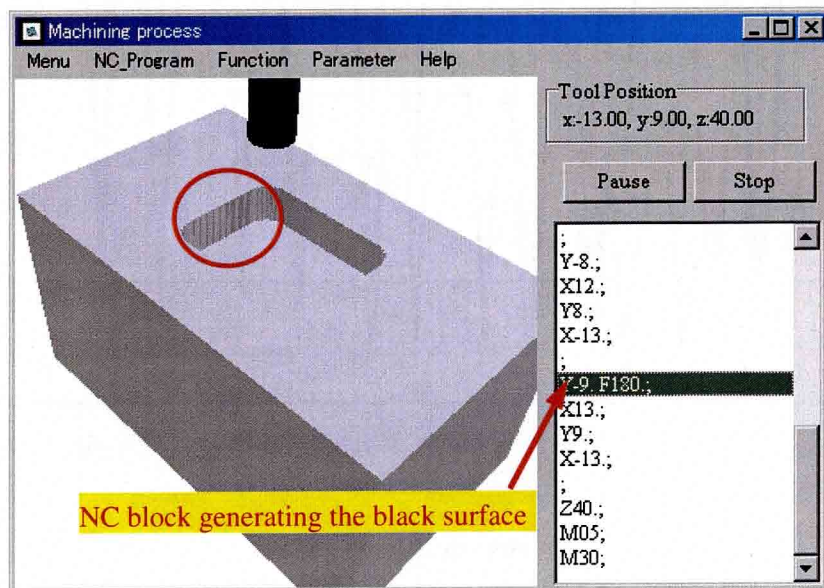
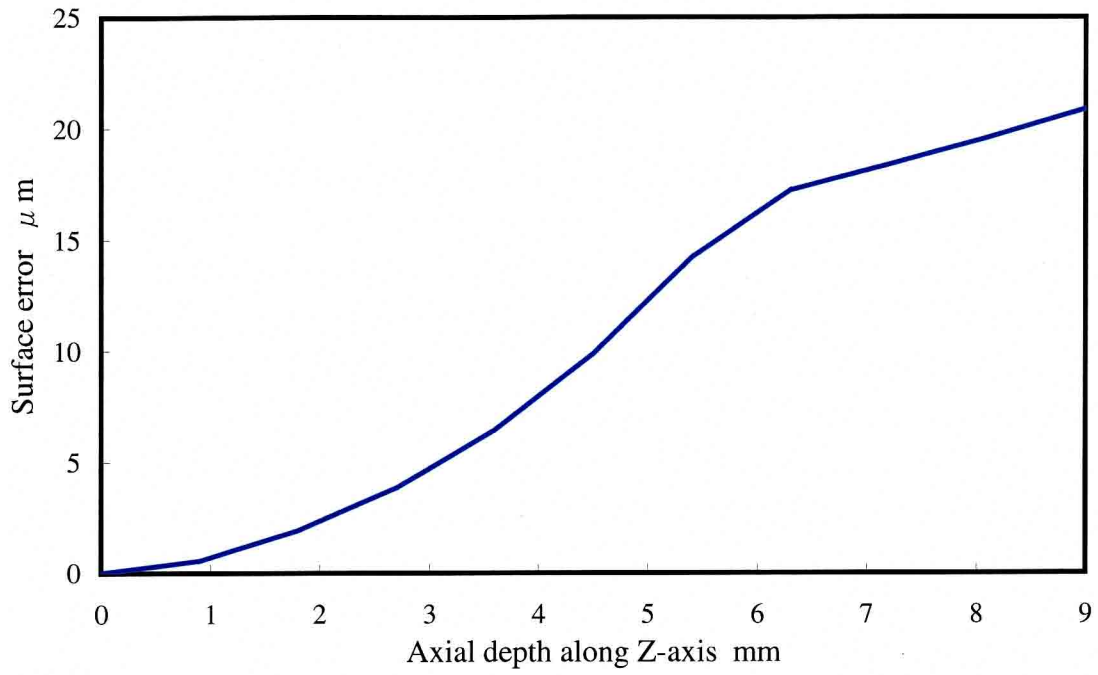
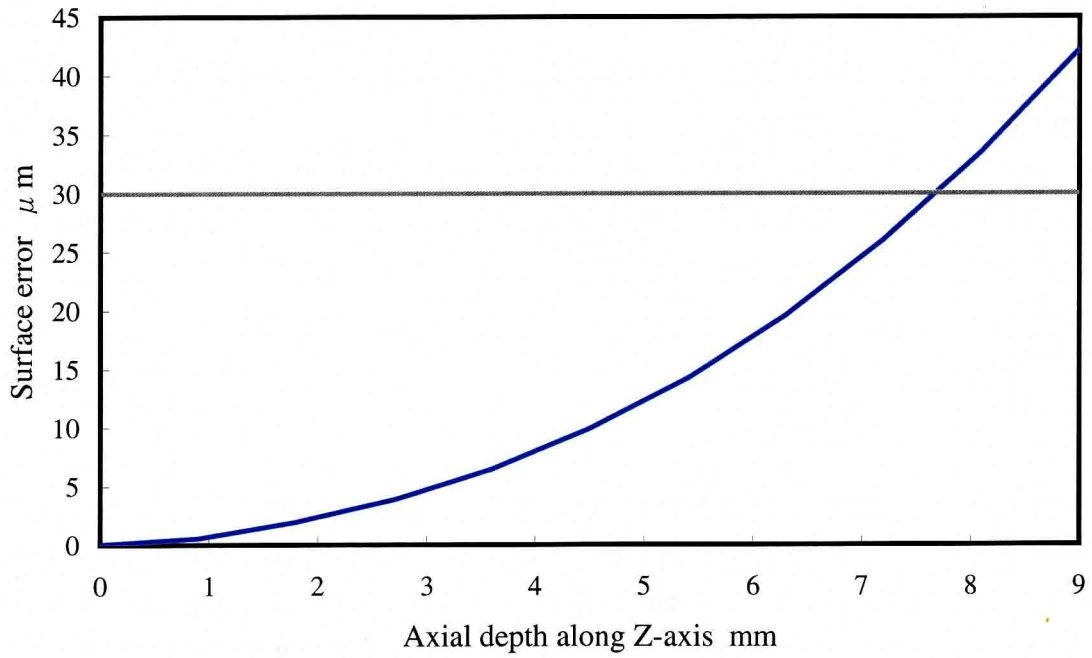


Fig.3.5.9 Selection of the machined surface



(a) Minimum machining error of selected face



(b) Maximum machining error of selected face

Fig.3.5.10 Estimated Machined Error of Machined Surface

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

前節では VMSim による加工工程の評価について述べたが、問題がある場合には、NC プログラムの修正をしなければならない。試行錯誤を繰り返して切削条件を修正することも可能であるが、自動的に修正することを試みる。ここでは NC プログラムの修正は送り速度を変化させて行うようにする。

本研究のように切削力や加工誤差に注目して送り速度を修正する方法は、金属除去量を一定にして加工中の負荷変動を抑制する方法[3-21, 3-22]よりも有効である。なぜならばエンドミル加工の場合、金属除去量が同じであっても半径、軸方向切込みが違う場合は、切削力も加工誤差も異なってくるからである。また最大切削力と最大加工誤差が送り速度に比例すると仮定して、送り速度を修正することも行われているが[3-23]、切削力には、送り速度に比例する要素と比例しない要素があるため、この仮定は必ずしも正しいとは言いきれない。

次に本研究で用いている送り速度の修正方法について述べる。まず現在の送り速度 F_c と、その時に推定される最大（最小）切削力の絶対値 CF_{max} 、目標最大切削力 CF_o から式 (3.5.4) を用いて送り速度を求める。

$$F = F_c \cdot \frac{CF_o}{CF_{max}} \quad (3.5.4)$$

その後、目標最大切削力を満たすように、物理シミュレータ（切削加工モデル）を参照しながら、送り速度の値を少しずつ（例えば 1 mm/min 毎に）変化させて、条件を満たすような送り速度を求めている。

加工誤差についても、最大加工誤差 ME_{max} と目標最大加工誤差 ME_o から式 (3.5.5) で送り速度を求め、切削力の場合と同様に物理シミュレータを参照しながら、送り速度の値を少しずつ変化させて求めている。

$$F = F_c \cdot \frac{ME_o}{ME_{max}} \quad (3.5.5)$$

荒加工の場合は、切削力のみを考慮すればよいので、前述した切削力から求められる送り速度を採用すれば良い。しかし最終加工面を加工する場合は、切削力と加工誤差の両方を考慮する必要がある。その場合は、それぞれの条件を満たす送り速度を求め、送り速度の値の小さい方を採用することとした。このような方法で、各工具位置における送り速度を決定していく。

図 3.5.11 に修正前後の NC プログラムの比較を示す。表の左側は修正前の NC プログラム、右側が修正後の NC プログラムを表している。

NC プログラムの前半は荒加工に相当するので、切削力だけが考慮されて修正が行われる。一方後半は、最終加工面を加工しているので、切削力だけでなく加工誤差が考慮されて修正が行われる。また一つの NC ブロックであっても、その途中で切削条件が変化し切削力や加工誤差が異

なる場合があるので、必要に応じて NC ブロックを分割して修正を行う。しかし NC プログラムでは、送り速度を区間で指令されなければならない。そこで現在の工具位置と一つ前の工具位置での送り速度を比較し、値の小さい方を採用して NC ブロックを生成するようにした。修正後の NC プログラムにおいて、黄色の部分は送り速度の修正のみが行われた NC ブロック、青色の部分は元の NC ブロックが分割され送り速度が修正された NC ブロックを表している。

さらに送り速度は、切削力や加工誤差に余裕がある場合は、要求を満たす範囲で増加させて加工時間を短縮することとした。従って今回の例のようなポケット加工を行う場合は、コーナー部における切削力や加工誤差の増加に対して、送り速度が低下し、コーナー部通過後は送り速度が増加している。

表 3.5.5 にポケットを加工するのに要する修正前後の時間の変化を示す。修正前の NC プログラムによる加工時間は約 86.9 秒で、修正後の NC プログラムによる加工時間は約 74.57 秒と切削力や加工誤差の要求を満たしながら、総加工時間を短縮することができた。

図 3.5.12 に修正後の最大切削力と最小切削力の変化の様子を示す。図からも明らかのように、切削力は要求された $-600\sim 600\text{ N}$ の範囲内になっているのが分かる。時間に対して、前半部分は切削力のみを考慮し、後半部分は切削力と加工誤差を考慮して送り速度が修正されている。図の前半部分を見れば分かるように、切削力が許容値に達していない場所についても、要求を満たす範囲で送り速度を大きくしているため、切削力が増加している。また、図の後半部分の切削力が 600 N よりもはるかに小さい値になっているのは、加工誤差を考慮しているためである。

さらに図 3.5.13 に修正前に調べた同じ最終加工面における最小と最大の加工誤差を示す。加工誤差についても、要求された $30\mu\text{m}$ 以下になっているのが分かる。これは、他の最終加工面に対しても同様のことがいえる。すなわち開発した VMSim により、要求を満たすように NC プログラムを自動的に修正することが可能であることが示された。

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

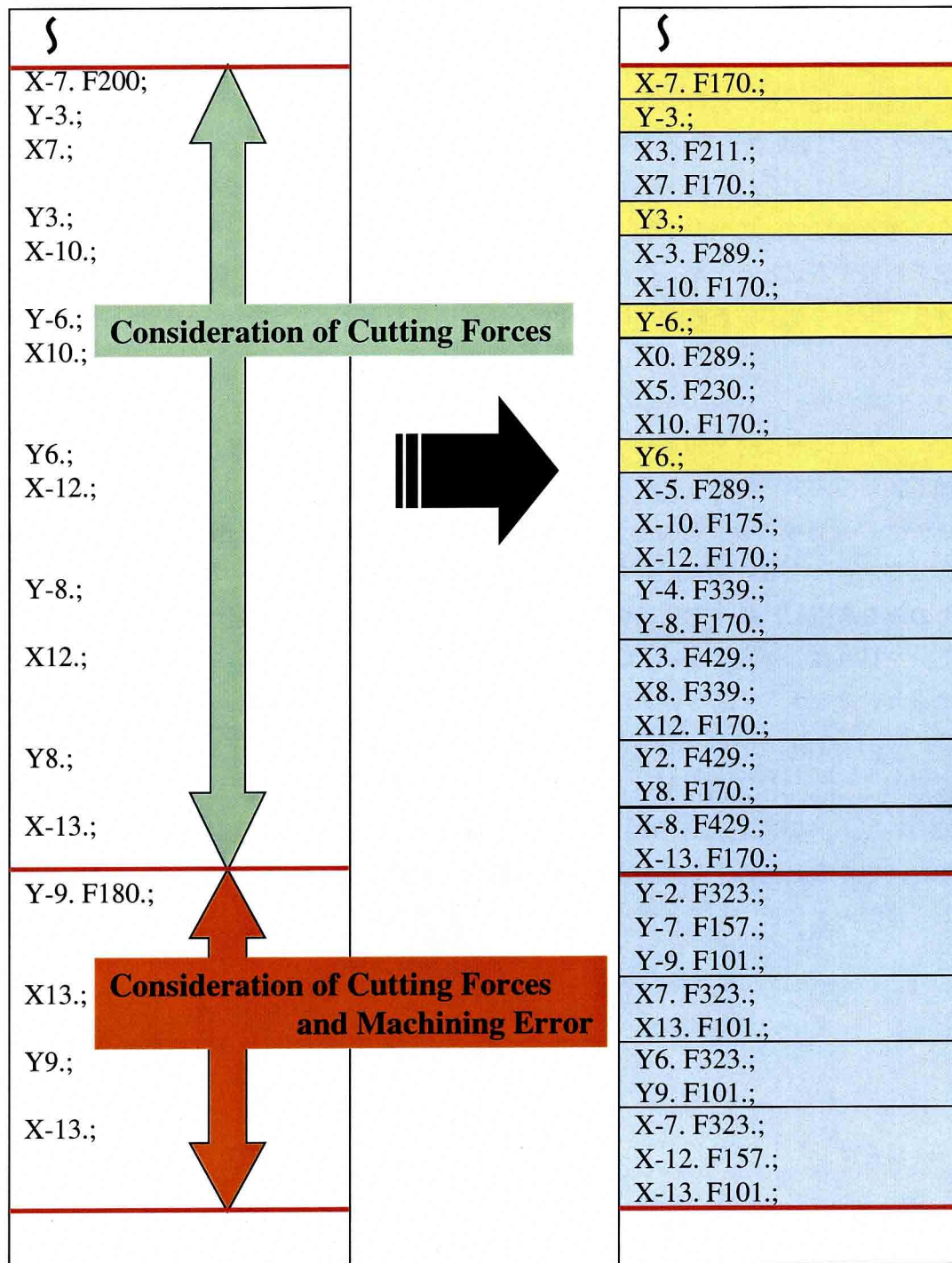
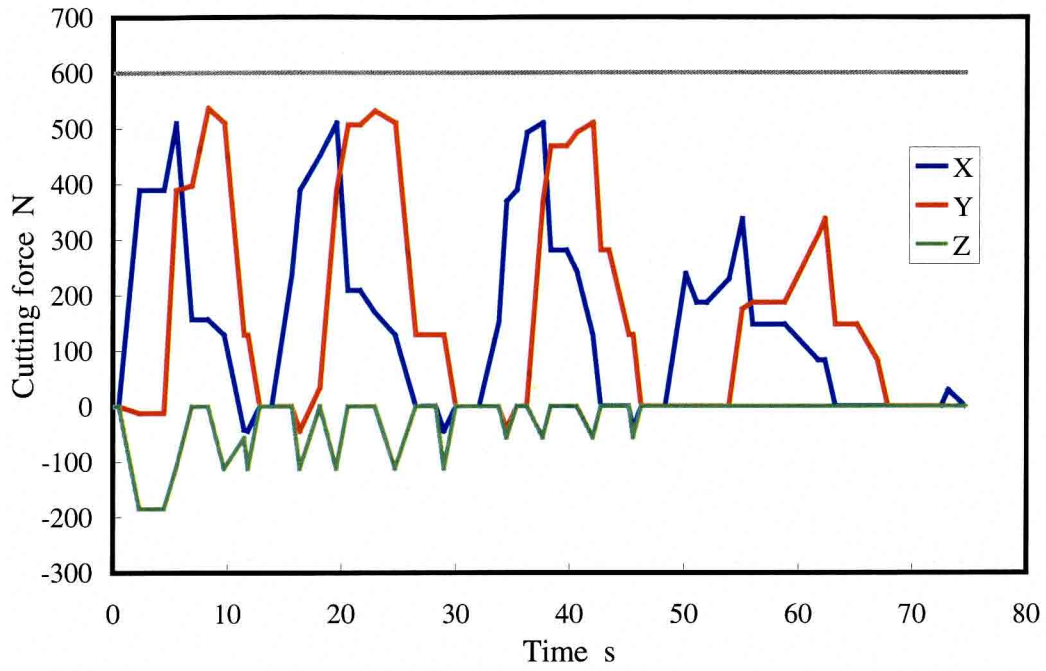


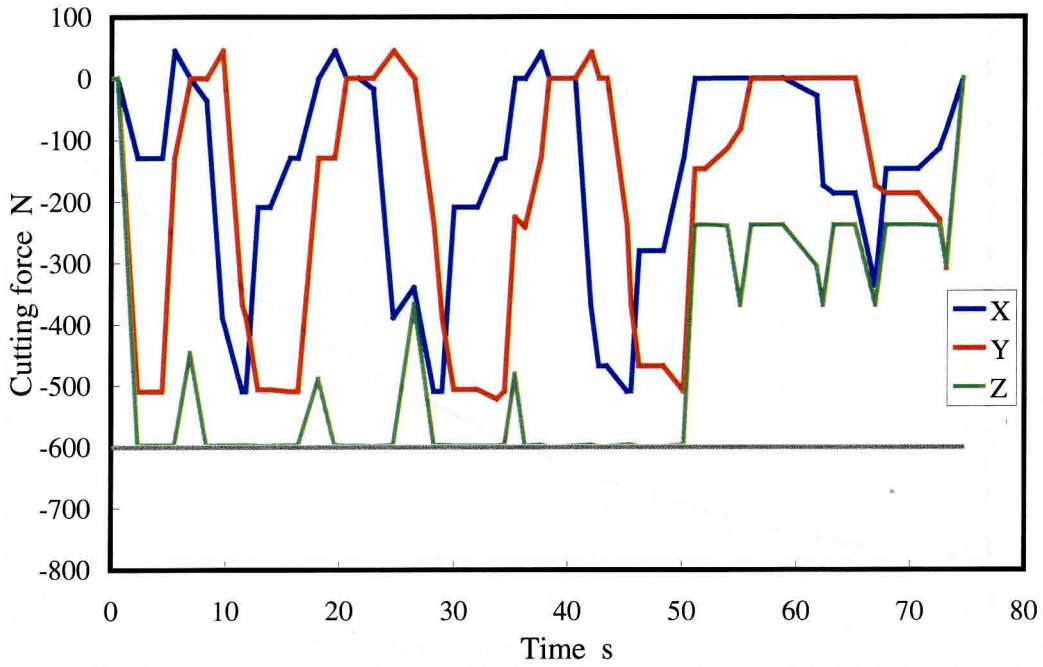
Fig.3.5.11 Comparison of Original and Modified NC Program

Table 3.5.5 Estimated Result of Machining Time

	Original NC	Modified NC
Machining time [s]	87.0	74.57



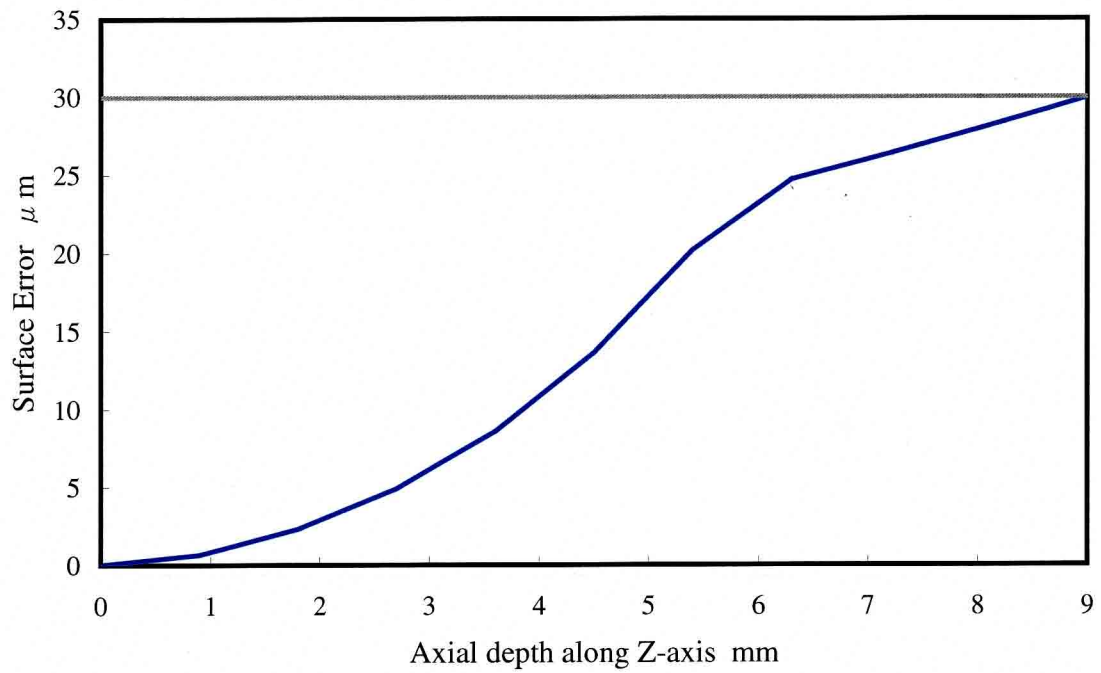
(a) Maximum Cutting Forces



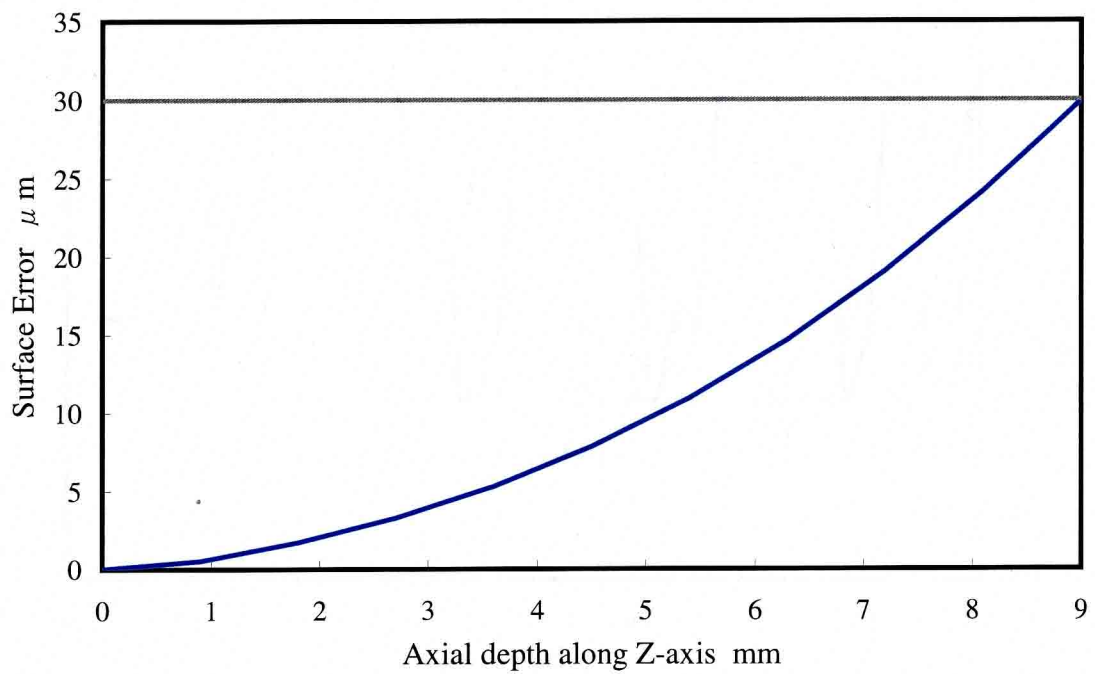
(b) Minimum Cutting Forces

Fig.3.5.12 Modification Result of Cutting Force

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)



(a) Changed result of minimum machining error



(a) Changed result of maximum machining error

Fig.3.5.13 Modification Result of Machining Error

3. 5. 4 実加工実験による検証

前節で行った VMSim による加工工程の評価と修正について、実際に加工を行って検証した。使用した工具、被削材、実験条件は前節で示したものと同一である。また図 3.5.14(a)に実験に使用した被削材の形状を、図(b)に加工後の形状を示す。

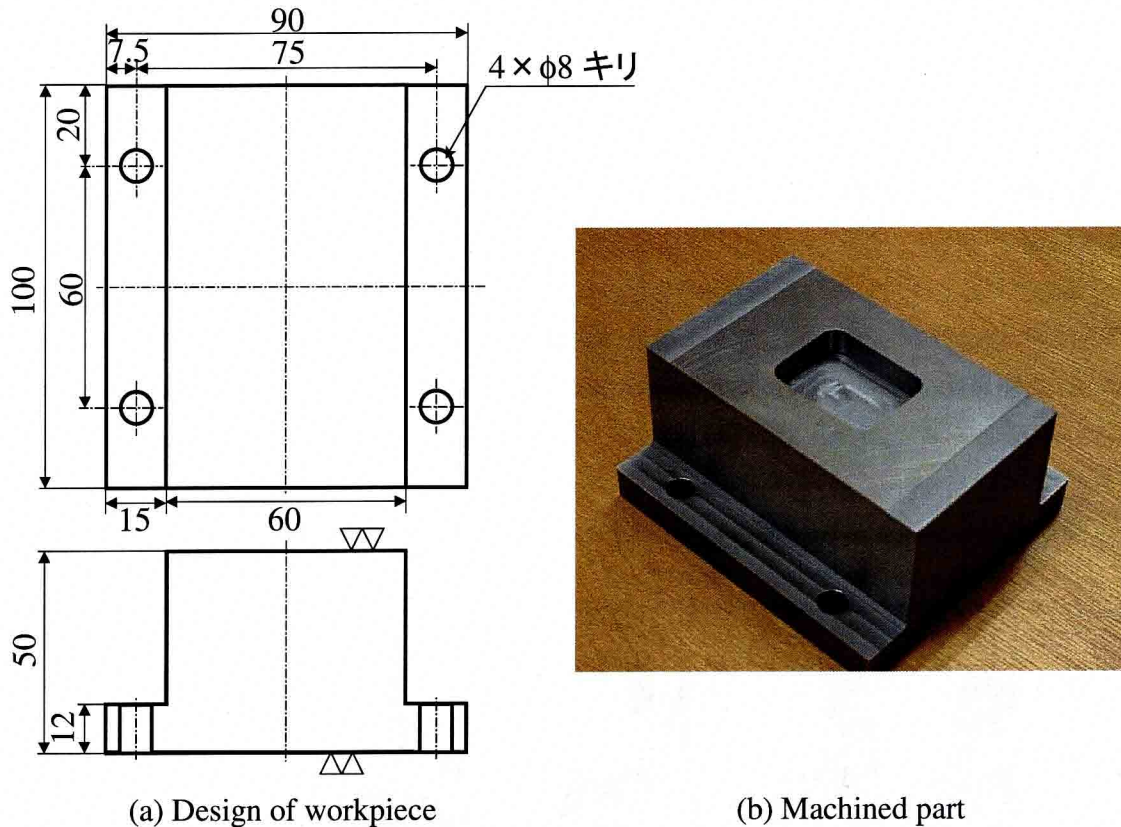


Fig.3.5.14 Workpiece design and machined part

使用した工作機械や加工中の切削力を測定するのに用いた器材は、3.5.2 節で示したものと同一である。また、加工誤差を測定するために用いた装置は以下のものがある。

- ・形状測定装置：CNC 三次元測定機マイクロコード (MITUTOYO 製, BHN305)

まず加工時間の結果は、修正前が約 87 秒とほぼ予測通りであったが、修正後は約 76 秒と若干であるが誤差を生じた。これは修正後の NC プログラムが送り速度をを頻繁に変化させているためであると考えられる。

図 3.5.15～図 3.5.17 に修正前の最小と最大の切削力の変化について、最小と最大の切削力の変化について、予測値と比較した結果を示す。これらの図を見ても分かるように、切削力の変化傾向は予測値と良く一致しており、VMSim の予測結果が妥当であることが証明された。また図 3.5.18～図 3.5.20 に修正後の最小と最大の切削力の変化について、予測値と比較した結果を示す。図を見れば分かるように、時間に対する切削力波形の予測結果と実験結果が若干ずれているのが分か

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

る。これも時間の場合と同様、修正後の NC プログラムが送り速度をを頻繁に変化させているためである。また場所によって、切削力波形が少し異なっていることもあるが、これも送り速度の変化の影響である。すなわち VMSim では、指令値に基づいた送り速度で予測しているのに対し、実際の加工では加減速度の影響で指令値通りの送り速度になっていないため、図のような結果になったと考えられる。VMSim は、実際に加減速度を考慮して切削力を求めることはできないが、これまで説明してきたように、加工中の切削力の傾向を把握することができ、加工戦略（切削条件など）を決定するための重要な指標になることが示された。

また図 3.5.21 に修正前の同じ面における最大の加工誤差について示す。図において計測値の加工面上の位置が 7mm までしかないのは、使用した形状測定装置のプローブの直径が 3mm なので、それ以上深い位置の加工誤差を計測できなかったためである。図を見れば分かるように、予測値は実験値と良く一致しているのが分かる。また図 3.5.22 に修正後の同じ位置の加工誤差を示す。この場合、若干ではあるが実験値の方が予測値よりも大きくなっている。これも送り速度の影響であると考えられる。この結果から、VMSim によって予測される加工誤差も加工戦略を決定するための重要な指標と成り得ることが示された。

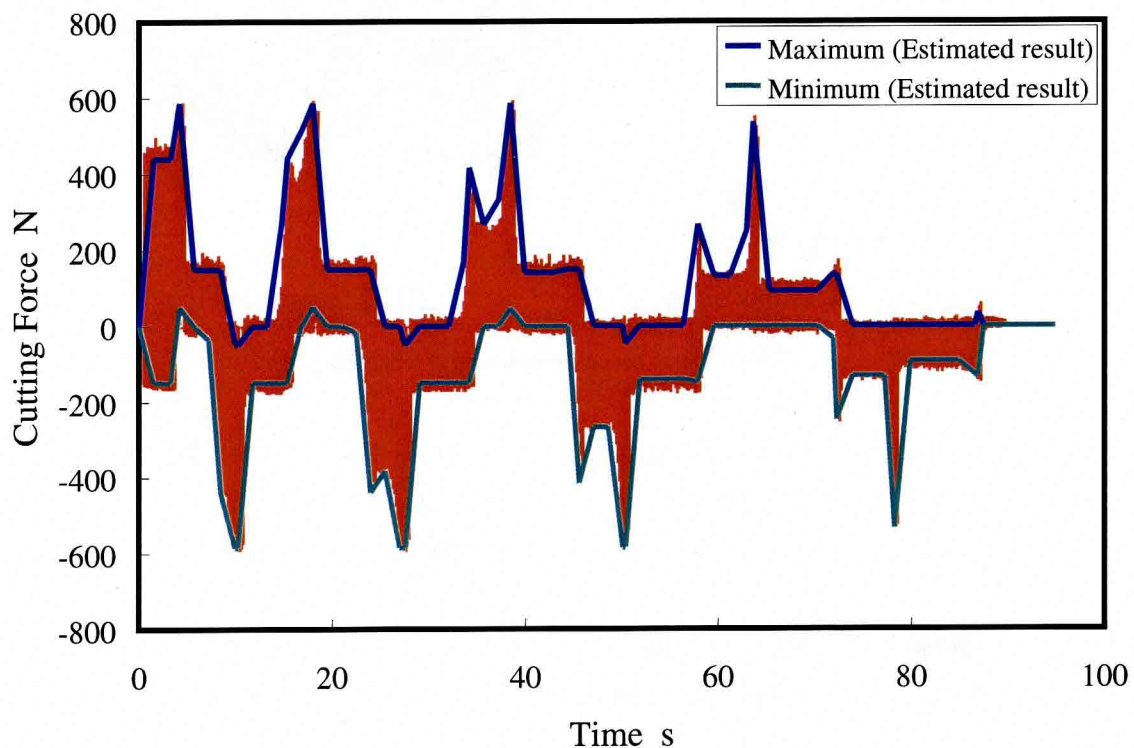


Fig.3.5.15 Comparison of estimated and measured cutting force along X axis (Original NC)

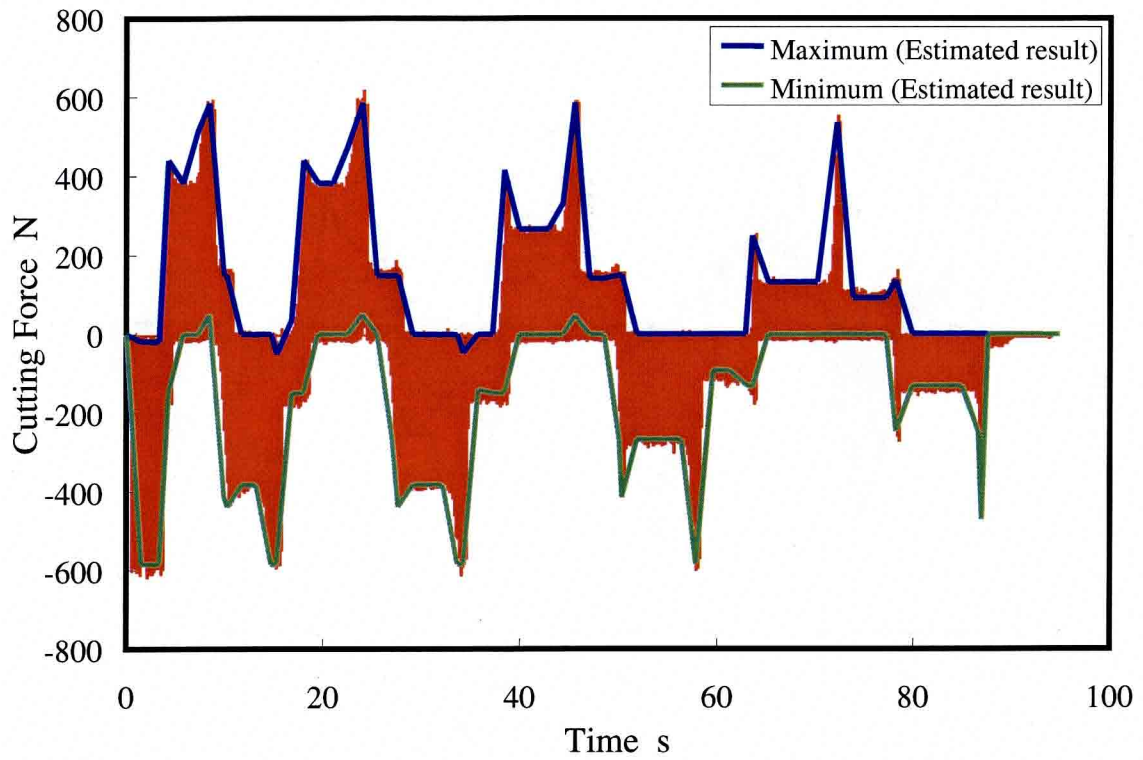


Fig.3.5.16 Comparison of estimated and measured cutting force along Y axis (Original NC)

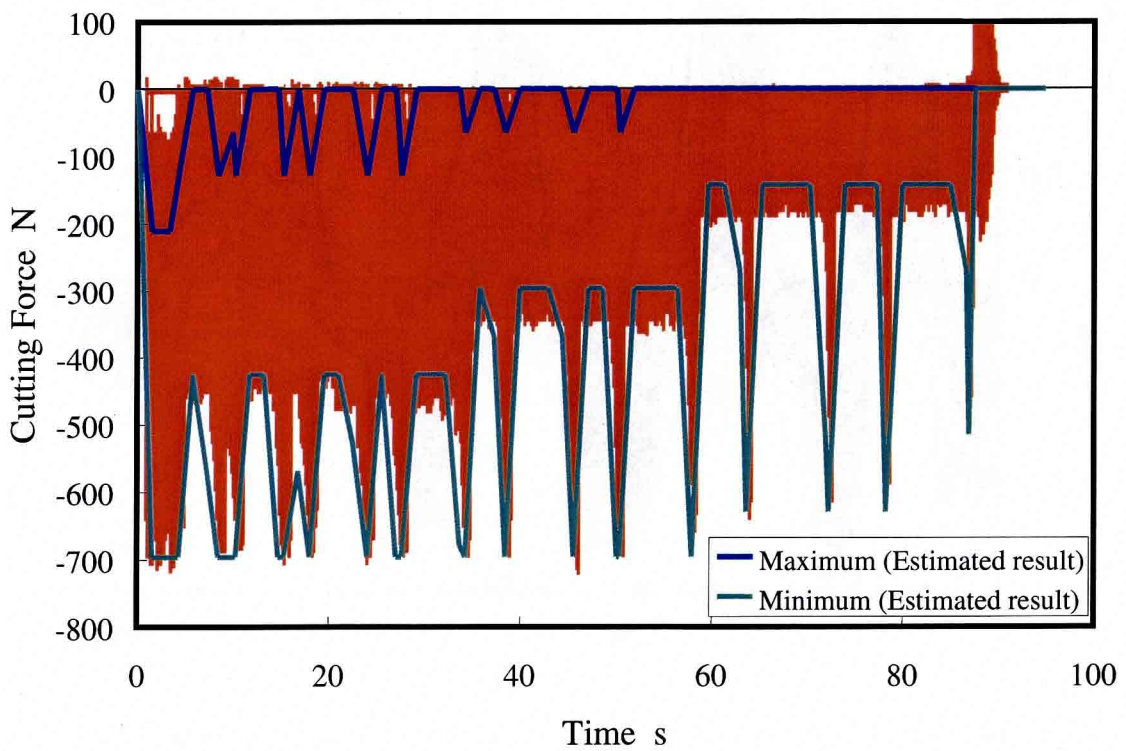


Fig.3.5.17 Comparison of estimated and measured cutting force along Z axis (Original NC)

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

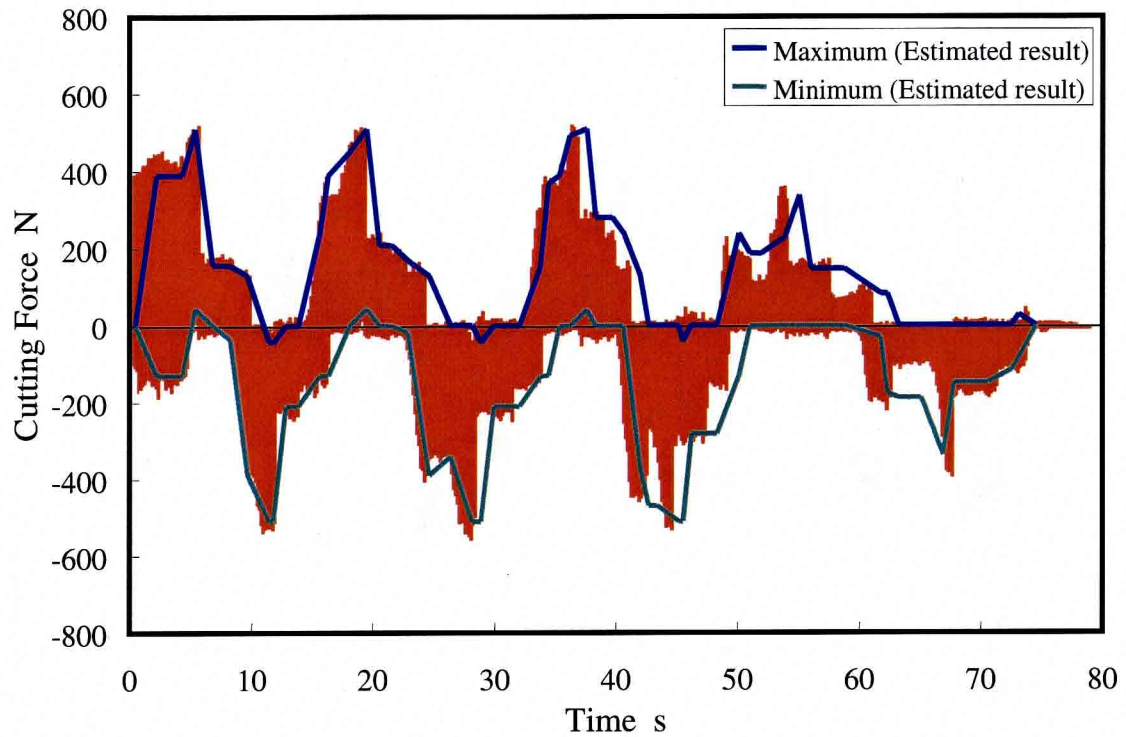


Fig.3.5.18 Comparison of estimated and measured cutting force along X axis (Modified NC)

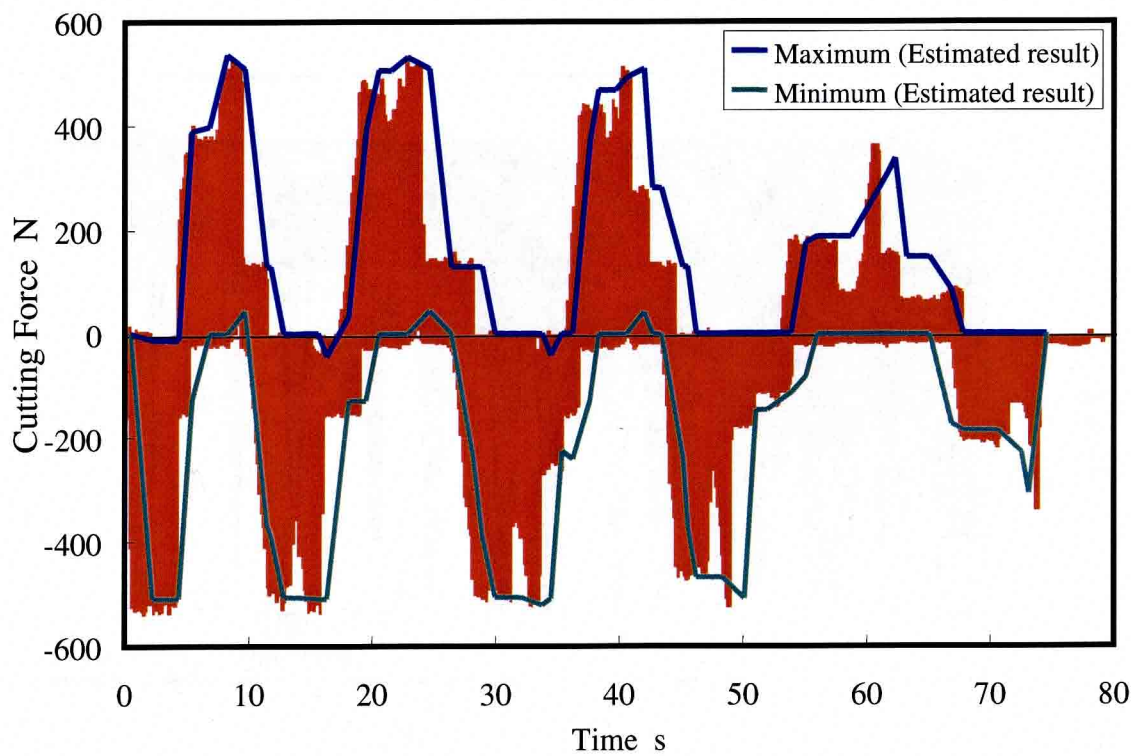


Fig.3.5.19 Comparison of estimated and measured cutting force along Y axis (Modified NC)

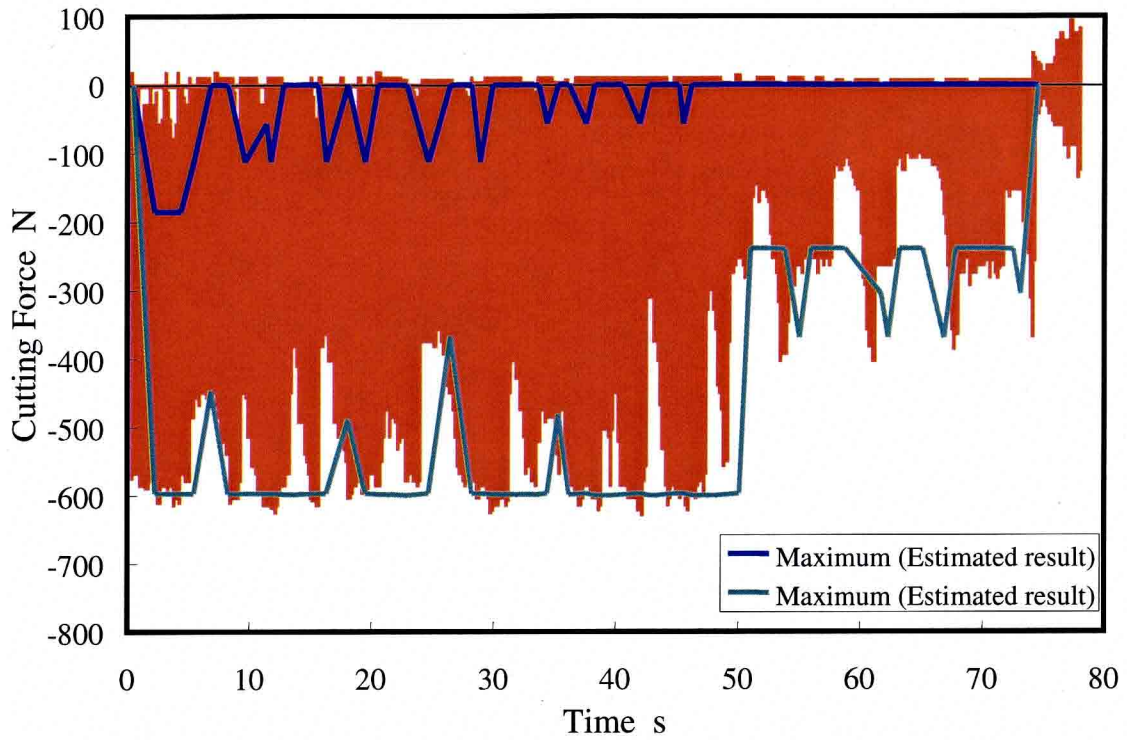


Fig.3.5.20 Comparison of estimated and measured cutting force along Z axis (Modified NC)

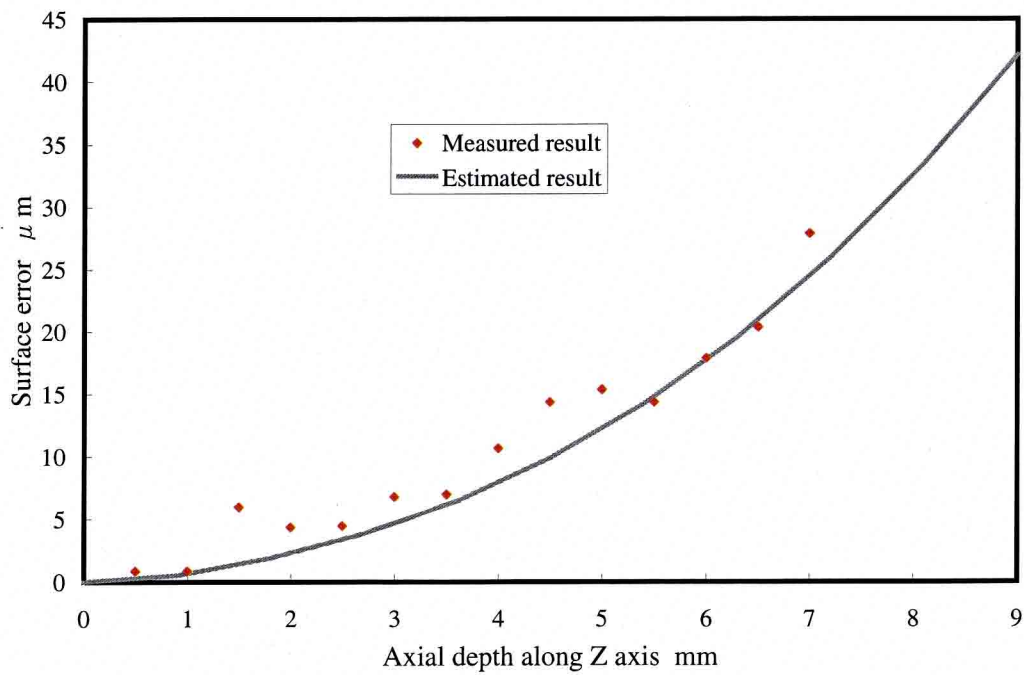


Fig.3.5.21 Comparison of estimated and measured surface error (original NC)

3. ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

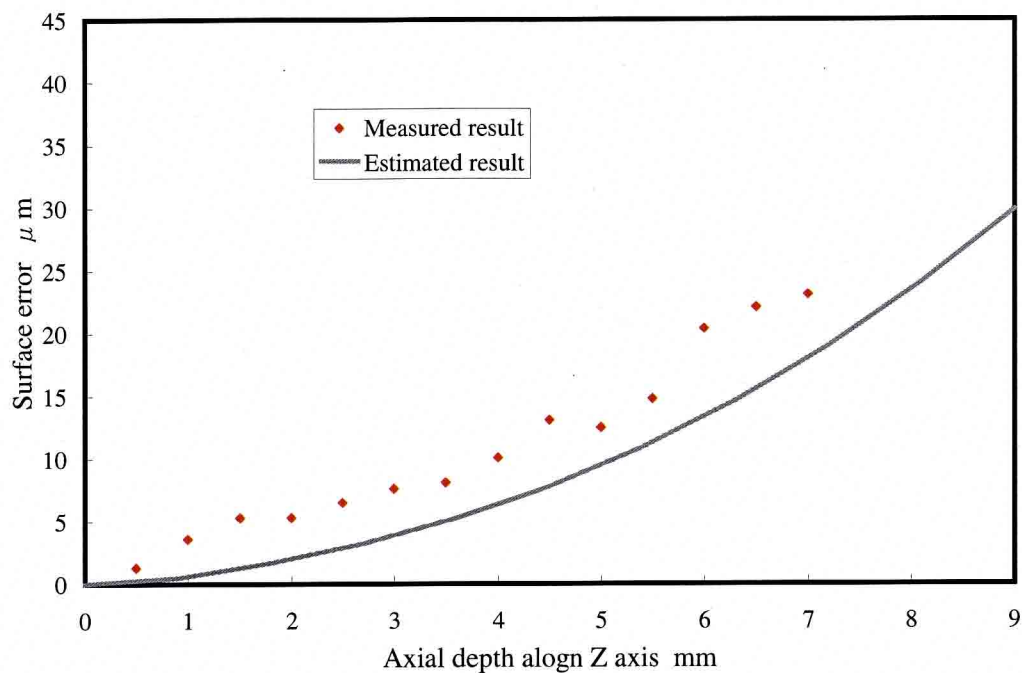


Fig.3.5.22 Comparison of estimated and measured surface error (modified NC)

3. 6 まとめ

パーソナルコンピュータ上で形状シミュレータと物理シミュレータを統合したバーチャルマシニングシミュレータ (VMSim) を開発した。これにより、工具経路情報と工具・被削材データから、切込みや金属除去量といった切削条件や、加工中の瞬間切削力、加工誤差を推定することが可能となった。また開発した VMSim を用いて、切削力や加工誤差に対する要求から、送り速度を変更することによって、NC プログラムの修正を行った。加工実験では、切削力の傾向が予測と一致することが確認された。加工誤差についても予測値とほぼ一致することが確認された。

4. インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG)

4. 1 工具経路生成アルゴリズム

2章でも述べたように、加工戦略を加工状況に対応して決定するためには、実加工の少し前あるいは、並行して指令データを生成する技術が必要である。特に、切削状況の変化に対応するためには、インプロセスで工具経路を生成する必要がある。そこで本節では、インプロセスで工具経路を生成する手法を提案し、工具経路生成システム (IP_TPG: In-Process Tool Path Generator) を開発する。

CAM では加工能率を考慮し複雑なアルゴリズムを駆使して、工具経路を生成することができるが、実時間で工具経路を生成・修正するためには、簡単なアルゴリズムが必要である。また加工する形状に依存せずに経路を生成できるようなものでなければならない。そこで本研究では、これらの要求を満足するようなアルゴリズムを提案する。

アルゴリズムの提案の前に、コンピュータ内で工具経路を生成するための空間の定義について検討する。一般的に空間を連続的に取り扱う場合と、空間を離散的な格子として取り扱う場合の2つがある。前者は衝突検出においては障害物の座標値と経路の座標値との干渉計算が必要になってくる。後者は障害物が格子の集合として表現するので、格子情報を見るだけで干渉の判定が可能である[4-1]。本研究の場合、製品の最終形状は加工を行う上で干渉してはならない領域であるので、製品の最終形状が障害物に相当する。ここでは、できるだけ簡単な方法で工具経路を生成する必要があるため、後者の格子空間内で工具経路を生成することとして話を進めていく。以下に提案する等高線加工と走査線加工のための経路生成アルゴリズムを示す。

等高線工具経路

まず、Z 軸座標値が一定とした粗加工用の等高線工具経路の生成方法について説明する。製品と被削材の形状データから、図 4.1.1(a)のように加工平面上に存在する素材と加工形状の輪郭線を求め、それを格子状に分割する。次に図 4.1.1(b)に示すように、加工する格子 (加工格子) と加工しない格子 (非加工格子) に分類する。格子の大きさは、半径方向切込みを基準にして決定する。そして、一つ一つの格子を矛盾がないように繋いでいくことによって工具経路を生成する。この時、画像処理におけるマスク処理[4-2]と同じように、ある決められた微小領域内に注目して処理を施していく。本研究では、除去すべき加工格子または移動すべき格子は、 3×3 の微小領域の格子に注目して決定するようにした。また格子空間に結合配列された各格子の状態から次の状態を決定するセルラーオートマトン[4-3, 4-4]のように、 3×3 の微小領域における各格子の状態から、除去すべき加工格子または移動すべき格子を決定するルールを作成して、工具経路を生成していくようにする。

4. インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG)

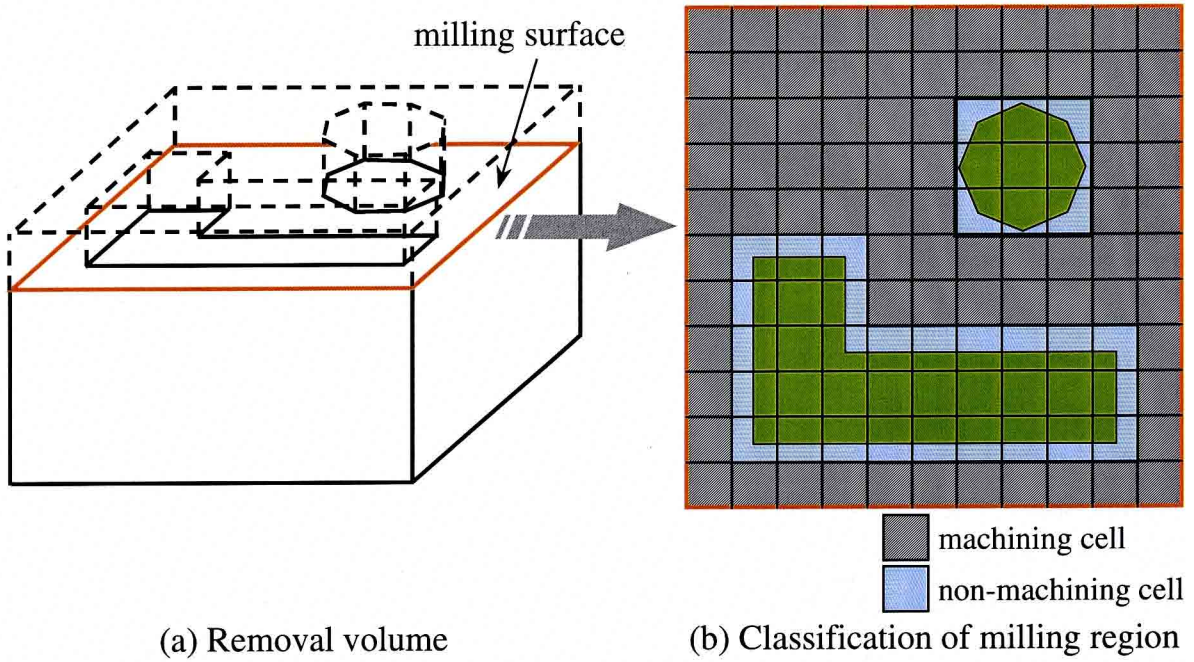


Fig.4.1.1 Generation of the machining cell for peripheral milling

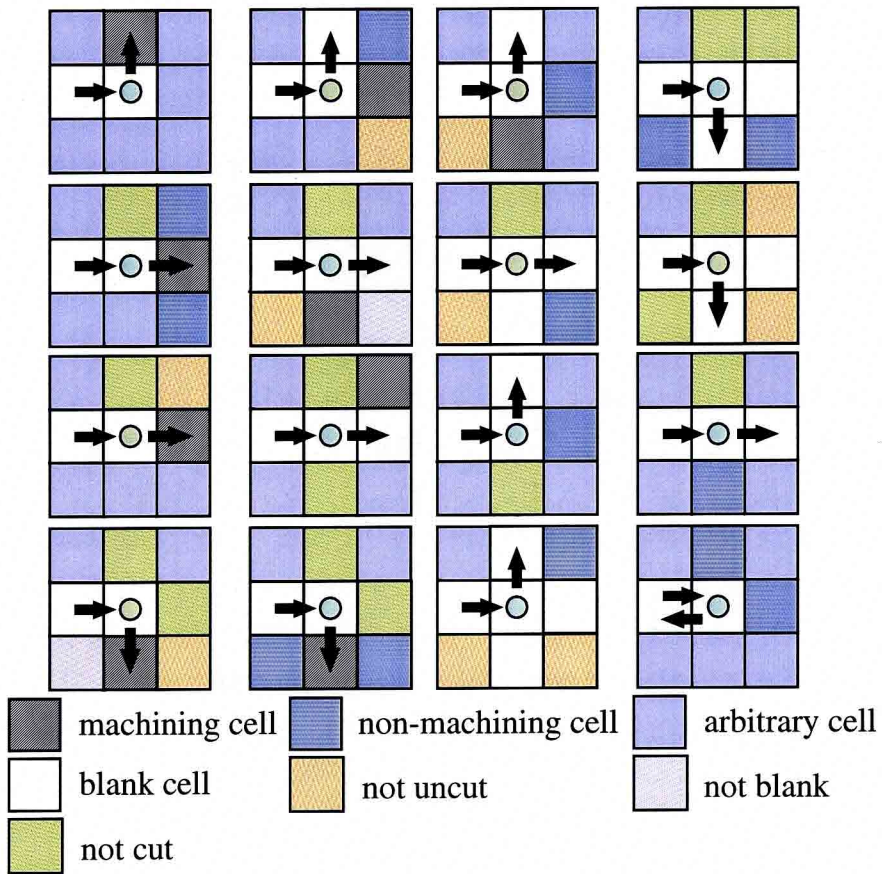


Fig.4.1.2 Algorithm of the tool path generation

本論文でも微小領域をマスクと呼ぶことにする。マスク左中央の格子から中心の格子へ移動してきた場合を考えると、次に除去すべき加工格子または移動すべき格子は図 4.1.2 に示すような各格子の位置関係からそれぞれ決定することができる。このようなマスクを移動させながら同様の処理を繰り返すことで、工具経路を生成することが可能となる。

図 4.1.3(a)のように、四角柱のボスが 3 つ存在する加工形状に、提案する荒加工用の等高線工具経路生成アルゴリズムを適用した場合に算出される工具経路を図 4.1.3(b)に示す。図に示されるように、提案するアルゴリズムによって問題なく工具経路が生成できることが確認された。またマスクを決定し、次の格子へ移動するのに要する時間は、1~2 ms であり、工具経路が実時間で生成可能であることも確認された。

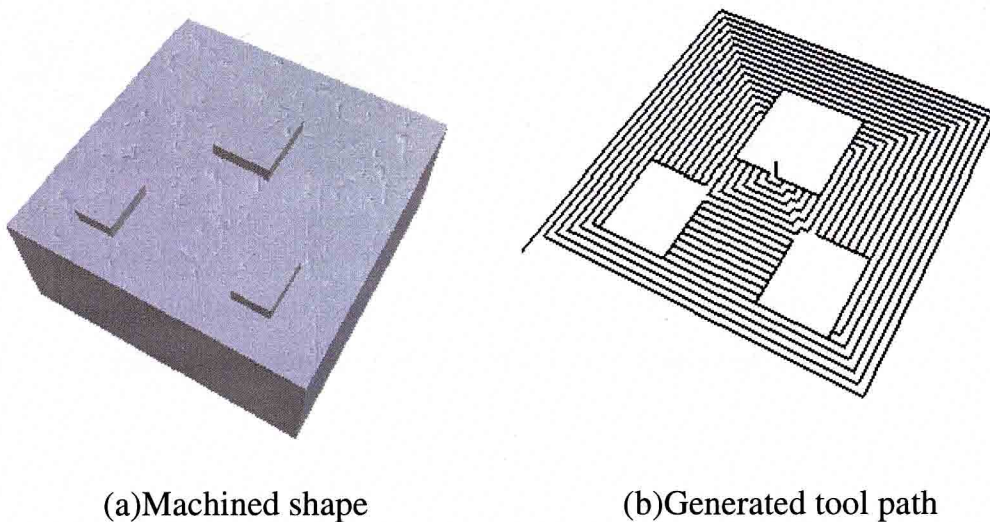


Fig.4.1.3 Generated example of peripheral tool path for rough cutting

走査線工具経路

次に走査線工具経路の生成方法について説明する。走査線工具経路の生成には XZ, YZ 方向に移動させる方法があるが、ここでは XZ 方向の経路生成について説明する。ただし、工具を YZ 方向に移動させる場合についても同じアルゴリズムが適用可能である。

まず図 4.1.4(a)のように、製品と被削材の形状データから、Y 軸上の点をピックフィード毎に移動させ、X 軸に並行な面を生成し、図 4.1.4(b)のように格子状に分割する。そして等高線工具経路生成の場合と同様に加工格子と非加工格子に分類し、図 4.1.2 に示したルールを用いて工具経路を生成していく。ただし、ある面において生成される経路が、面を構成する領域の X 方向の最大値または最小値まで来た場合は、次の面に移動するようにし、連続して加工を行うようにした。そして、この処理をすべての加工格子が無くなるまで行う。図 4.1.5 は生成される走査線工具経路の一例である。等高線工具経路と同様に、提案する荒加工用の走査線工具経路生成アルゴリズムによって問題なく工具経路が生成できることが確認された。また、等高線工具経路と同様に、実時間で生成可能であることも確認された。

4. インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG)

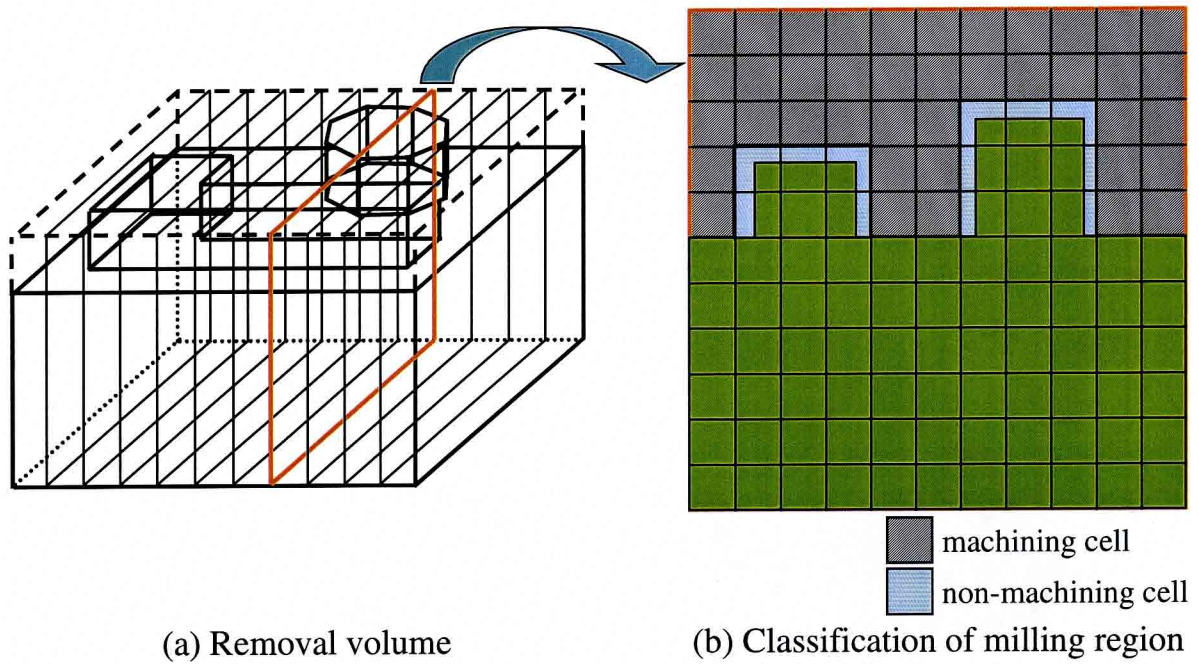


Fig.4.1.4 Generation of the machining cell for bi-direction milling

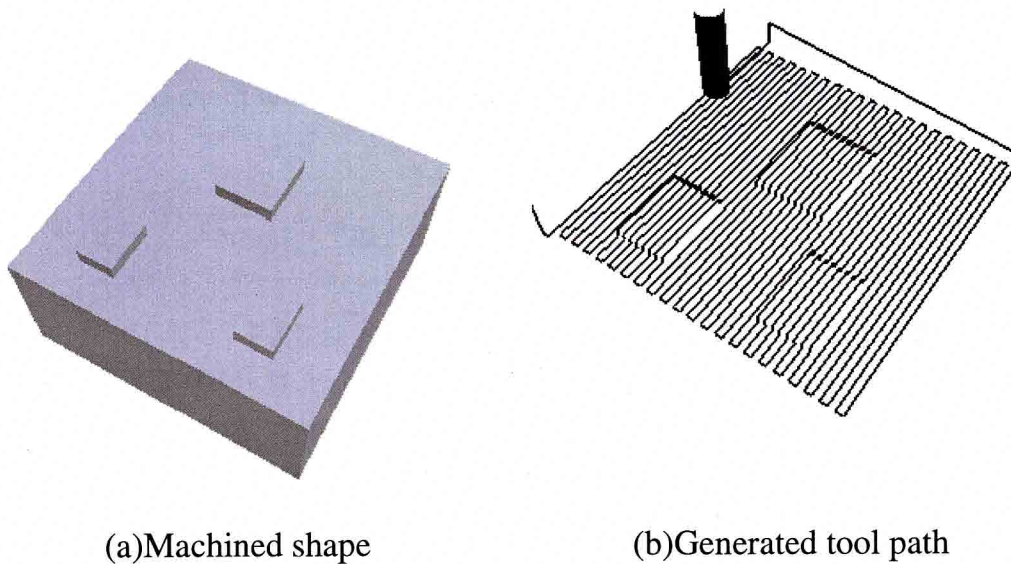


Fig.4.1.5 Generated example of bi-direction tool path generation for rough cutting

4. 2 工具経路の修正

加工中に過度の切削力やびびり振動といった加工トラブルが発生した場合には、回避行動をとらなければ工具や被削材、工作機械などに悪影響を与えてしまう。もし加工トラブルが発生した場合には、まず送り速度や主軸回転数の修正を行い回避が試みられるが、それでも回避できない場合、軸方向切込みや半径方向切込みの変更をして、経路を修正する必要がある。そこで4. 1節で説明した経路生成方法を基に経路の修正を検討する。

等高線工具経路

図 4.2.1 は提案した等高線工具経路用アルゴリズムを基にした経路の変更方法を示している。図 4.2.1(a)は軸方向切込みを修正する場合を表している。この場合は、加工中の加工面の情報を、一つ前の加工面と現在の加工面の間に現在の加工面の情報をコピーし、工具の位置を対応させることによって実現される。その際、加工面上で変更された格子番号を記録しておき、コピーされた加工面を加工した後に、元の加工面上の記録された格子へ移動して続けて加工を行えるようにした。また、図 4.2.1(b)は半径方向切込みを修正する場合を表している。この場合は格子を 1/4 の大きさに分割することによって、半径方向切込みの修正が実現される。再分割された格子に対しても、3×3 のマスクに注目して図 4.1.2 に示したアルゴリズムを適応することが可能で矛盾なく工具経路を生成することができる。

図 4.2.2(a)と(b)は、軸方向切込みと半径方向切込みの変更を行い、工具経路の修正を行った結果をそれぞれ示している。図の○印は切込みの変更が行われた場所を示している。図に示されるように、インプロセスで工具経路を修正することが可能になった、また、その後も問題なく工具経路が生成できることも確認された。

走査線工具経路

図 4.2.3 は提案した走査線工具経路用アルゴリズムを基にした経路の変更方法を示している。図 4.2.3(a)は軸方向切込みを修正する場合を表している。この場合は、この場合は格子を 1/4 の大きさに分割することによって、半径方向切込みの修正実現される。再分割された格子にも図 4.1.2 のルールを適用することによって、矛盾のないように工具経路を生成していく。図 4.2.3(b)は半径方向切込みを修正する場合を表している。この場合は、一つ前の加工面と現在の加工面の間に現在の加工面の情報をコピーし、その位置へ工具を移動させることによって実現される。

図 4.2.4(a)と(b)は、軸方向切込みと半径方向切込みの変更を行い、工具経路の修正を行った結果をそれぞれ示している。図に示されるように、インプロセスで工具経路を修正し、その後も問題なく工具経路が生成できることが確認された。

これまで説明してきたように、提案したアルゴリズムは工具の各位置ごとに次の移動場所を決定しているので、加工状況に応じて切削条件を決定し、工具経路を柔軟に生成していくことが可能になる。

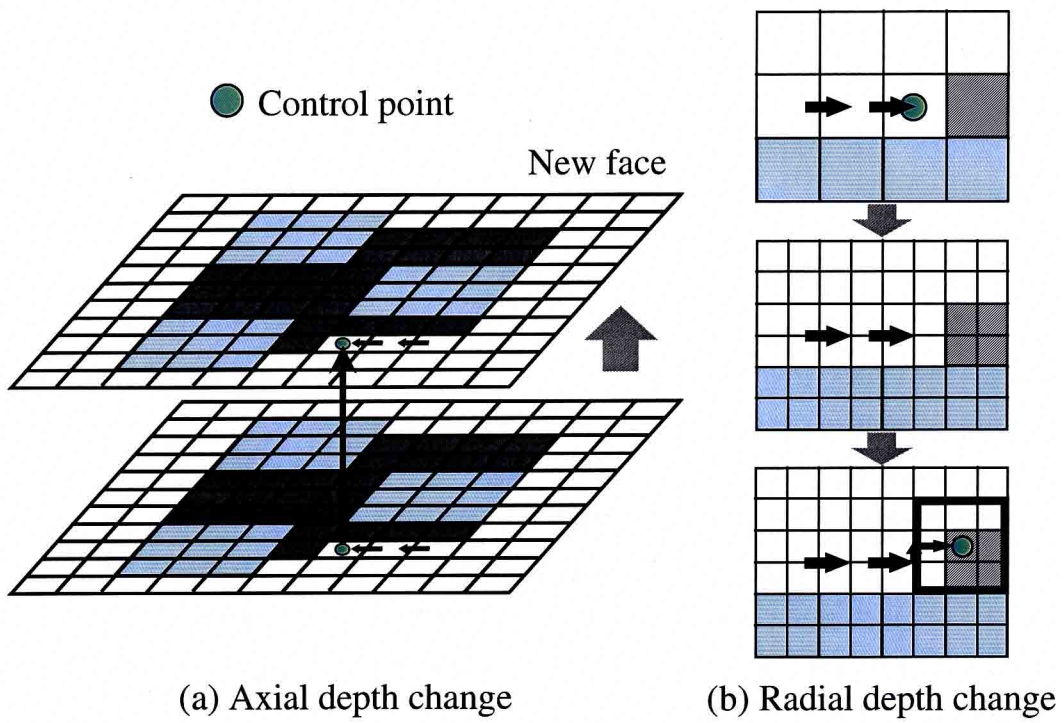


Fig.4.2.1 Modification method of peripheral tool path

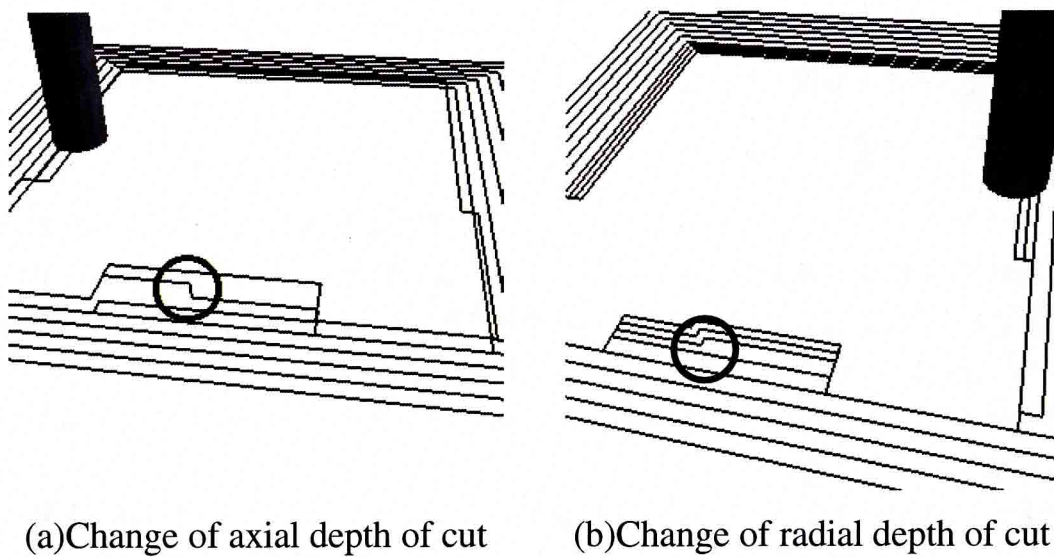


Fig.4.2.2 Modification example of contour tool path

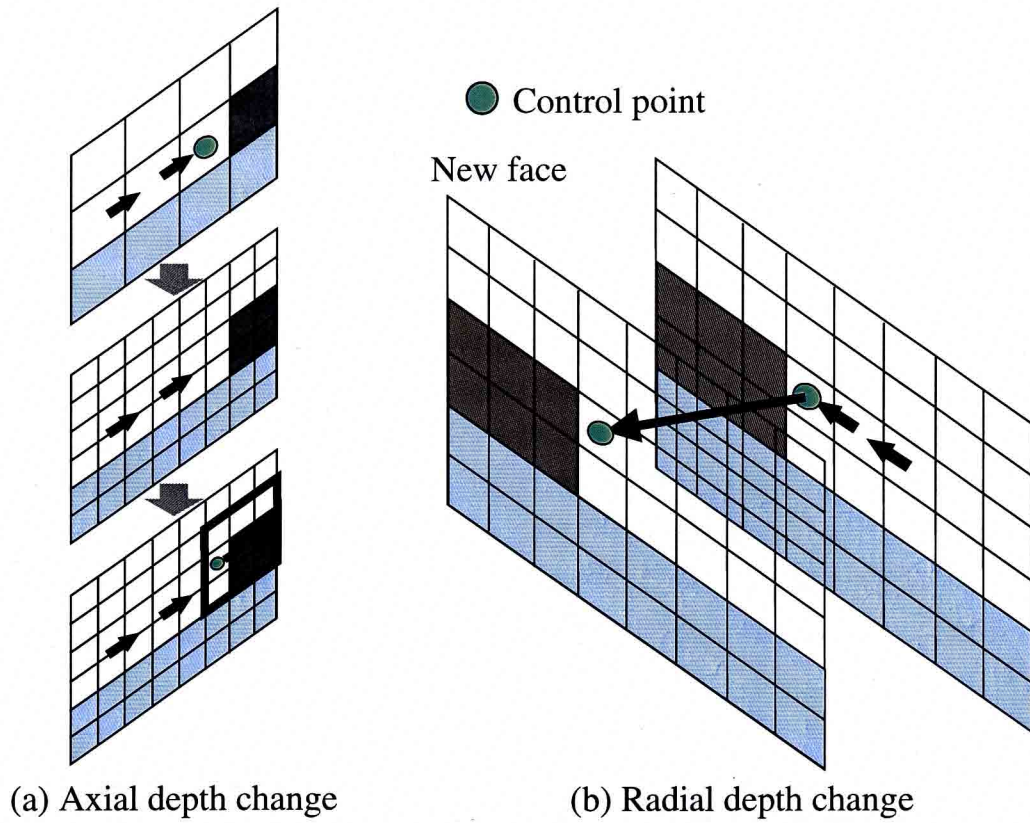


Fig.4.2.3 Modification method of bi-direction tool path

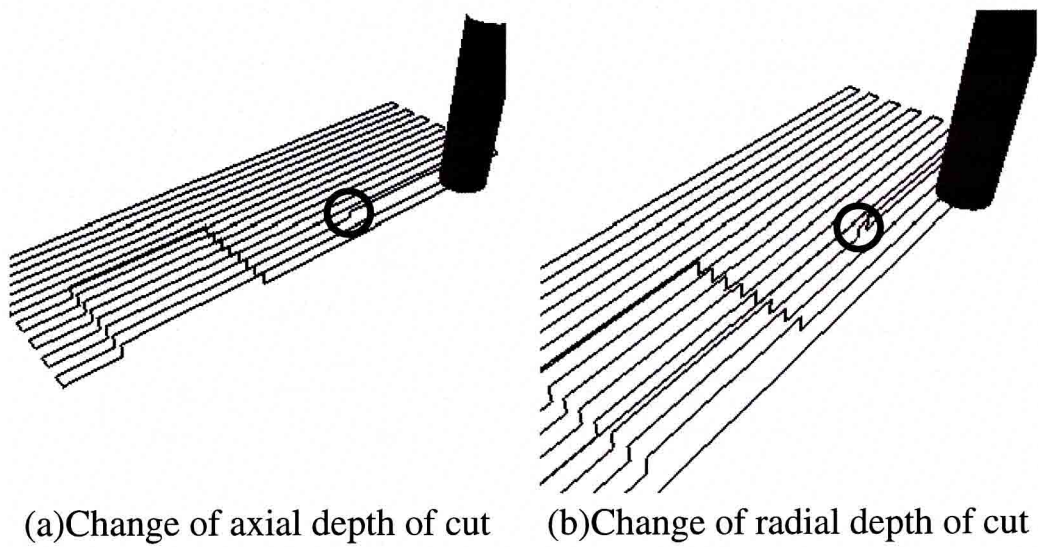


Fig.4.2.4 Modification example of bi-direction tool path

4. インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG)

4. 3 加工順序情報との統合

さらに高度な加工を行うためには、加工する全ての領域を幾つかの領域に分類し、それぞれの位置関係から加工する順番を決め、特定の加工領域ごとに工具経路を生成すべきである。これは現在の加工において作業者が工作機械での加工前に、工程設計や作業設計をする場合と同じである。

本研究では、2章で説明したように Management ブロックにおいて、形状データから図 2.3.2, 図 2.3.3 に示すような加工フィーチャとそのトポロジー情報を自動的に抽出し、それに基づいて加工を行うと想定している。そこで、上流層 (Management ブロック) からこれらの情報が与えられると仮定し、その加工フィーチャごとに工具経路を生成できるように開発を行った。さらに 4.1 節, 4.2 節で提案した等高線と走査線の工具経路を効率的に使うため、図 4.3.1 に示すように加工フィーチャごとに工具経路パターンを予め決めておいて、工具経路を生成することとした。

図 4.3.2 に加工フィーチャ毎に工具経路を生成した場合の出力例を示す。この例では、ステップとポケット、ボスの3つの加工フィーチャから成り立つ製品形状である。図に示すように、フィーチャ毎に経路を生成できているのが分かる。

また仕上げ加工用工具経路は、製品の最終形状に沿って工具を移動させることによって実現される。

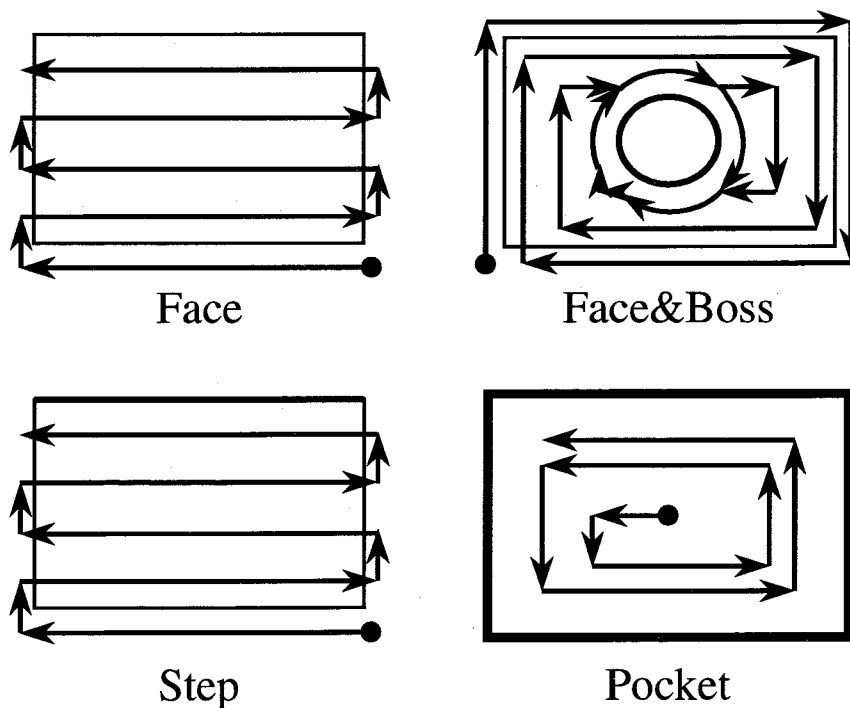


Fig.4.3.1 Assigned tool path pattern for machining feature

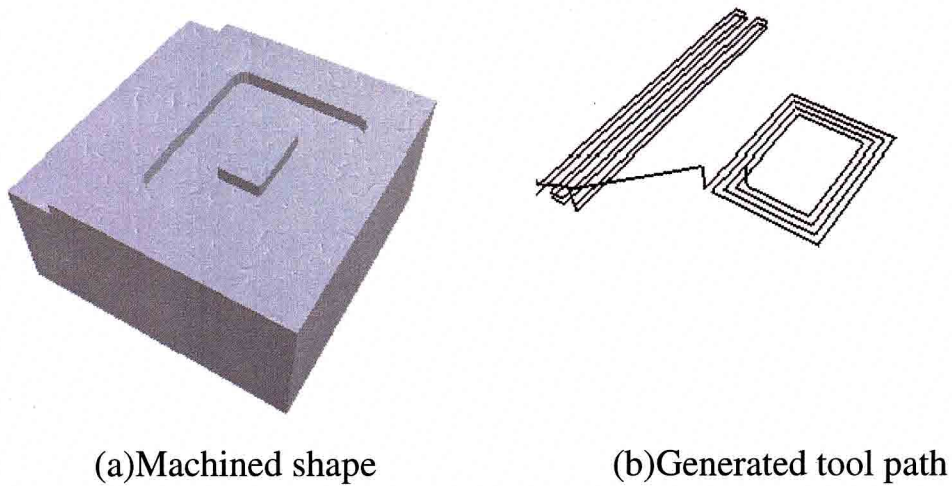


Fig.4.3.2 Output example of tool path for the product consisting of several machining feature

4. 4 まとめ

加工面を格子分割して、矛盾なく加工格子を連続して除去できるようなアルゴリズムを提案し、自律加工を行うために必要なインプロセス工具経路生成システム (IP_TPG) を開発した。このシステムにより、荒加工用の等高線と走査線の工具経路を実時間で生成できるようになった。また加工トラブルに対しては、工具経路を柔軟に変更する方法について検討した。すなわち、工具経路変更後も矛盾なく経路を生成できることを示した。

4. インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG)

5. 自律加工実験

5. 1 システム構成

2章で提案した AIMac による自律加工の可能性を示すために、3章で説明した VMSim とモデル参照型切削条件修正機能、4章で説明した IP_TPG を統合した。これは AIMac の Prediction ブロックと Strategy ブロックを用いた加工に相当する。これにより、予測情報に基づく加工戦略の決定を実時間で行うといったフィードフォワード制御が可能になる。

図 5.1.1 は統合されたシステム間のデータの流れを示している。まず加工形状と加工フィーチャ、フィーチャのトポロジー情報、被削材形状、工具形状が入力されると、IP_TPG は工具経路を生成する。ただし、IP_TPG はインプロセスで工具経路を生成しているため、厳密には次の工具位置情報である CL data が出力されている。計算された工具位置情報を基に VMSim は、加工工程の予測を行い、3.5節で説明したモデル参照型切削条件修正機能 (Model reference modification) が加工に対する要求を考慮して切削条件の修正を行う。

ここで加工に対する要求とは、工作機械や工具の性能に関する項目や、製品の加工精度、びびり振動や過度の切削力といった加工トラブルの回避などである。もし送り速度の変更で要求を満足することができるならば、その加工指令が工作機械に転送される。

ただし、送り速度の変更では要求を満足させることができず工具経路の変更が必要であるならば、IP_TPG に戻って4.2節で説明した方法を用いて経路の修正を行う。その際は、まず軸方向切込みを修正し、前述した同じ処理を実行し送り速度が修正される。これで問題がなければ加工指令が工作機械に転送される。軸方向切込みの変更後も経路変更が必要な場合は、半径方向切込みの修正が行われ、送り速度が修正される。その後も経路の変更を行う必要がある場合は、軸方向切込み、半径方向切込みの順番で経路の修正が行われていく。図 5.1.2 に、この切削条件修正の手順をフローチャートで表現したものを示す。

従って、切削条件の修正項目は以下の通りである。

1. 送り速度の変更
2. 軸方向切込みの変更
3. 半径方向切込みの変更

このように、加工状況や加工トラブルに応じて柔軟に切削条件を修正して加工を行うシステムは、これまでの NC プログラムによる加工の概念と大きくことなり、本研究の優れている点であると言える。

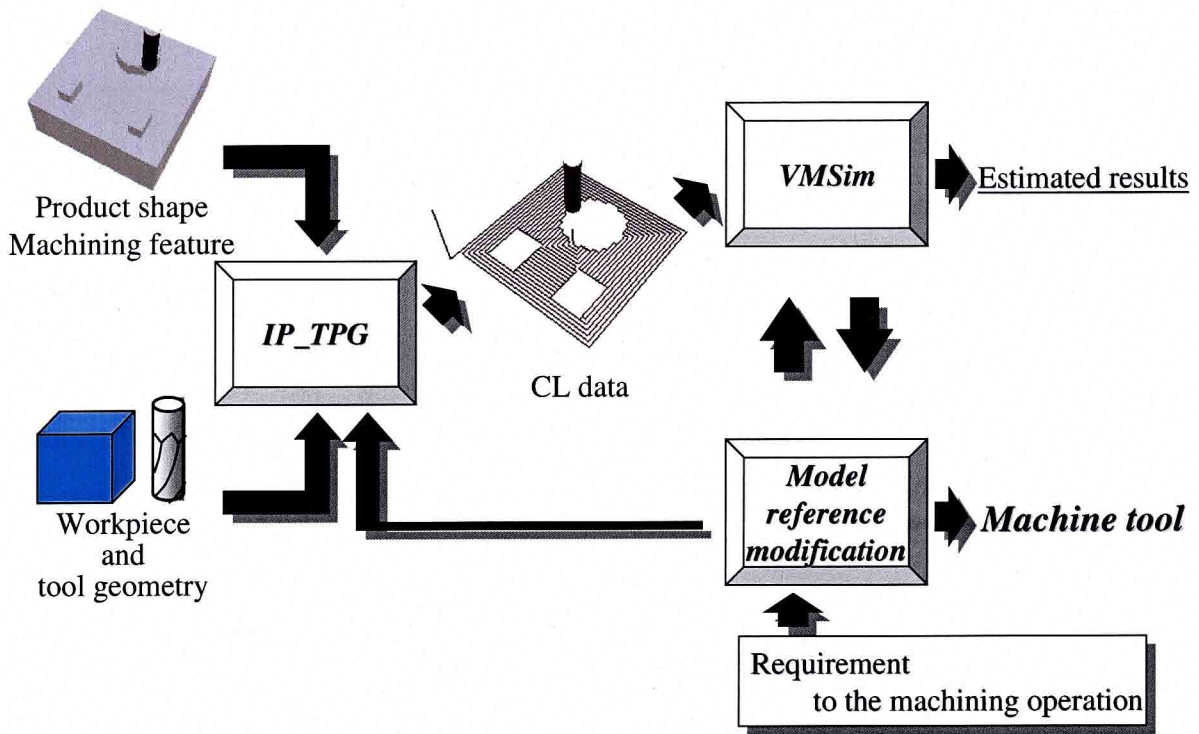


Fig.5.1.1 Data flow between IP_TPG and VMSim

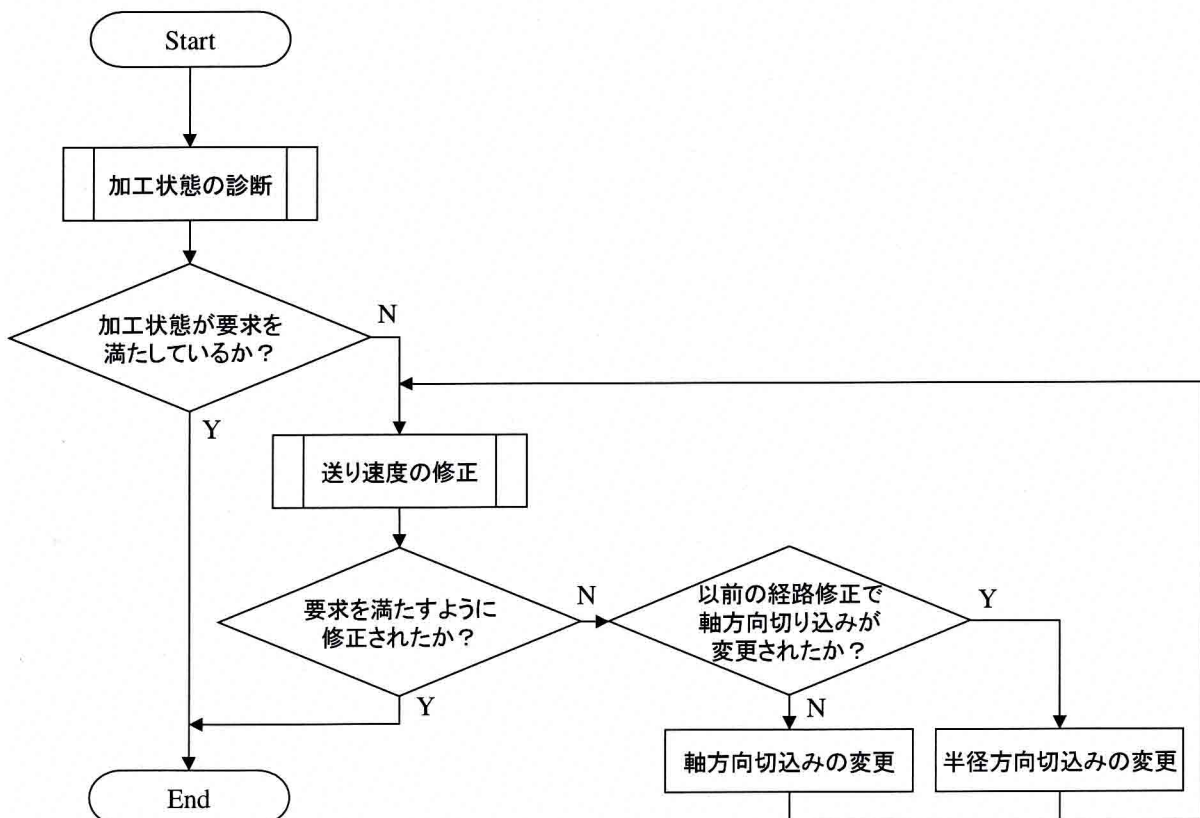


Fig.5.1.2 Modification flow chat of cutting conditions

5. 2 実験装置

自律加工実験に使用した実験機器は以下の通りである。

- ・マシニングセンタ：立型マシニングセンタ（OKK 製，VM 4-II）
- ・動力計：水晶圧電式 3 成分動力計（KISTLER 製，Type9257B）
- ・チャージアンプ：（KISTLER 製，Type5019A）
- ・データレコーダ：高密度多重 PCM 記録方式データレコーダ（TEAC 製，RD-125T）
- ・A/D 変換：（ナショナルインストラメンツ製，LabVIEW）
- ・データ通信用バス：（ファナック製，HSSB: High Speed Serial Bus）
- ・コンピュータ：PC/AT コンピュータ，（Pentium III Xeon 550MHz, 256MB RAM, Windows NT 4.0 Workstation）

実験装置の概要を図 5.2.1 に示す。統合システムを実行させるコンピュータとマシニングセンタの NC 装置が HSSB で接続されている[5-1]。統合システムから出力される加工指令情報は、工具移動量毎に NC ブロックに変換され、NC 装置に転送される。また加工中の切削力データは、被削材の下に取り付けられた動力計からチャージアンプを通して増幅された後に、データレコーダで DAT テープに記録される。そして加工終了後に、DAT テープに記録されたデータを A/D 変換してコンピュータ上で解析する。

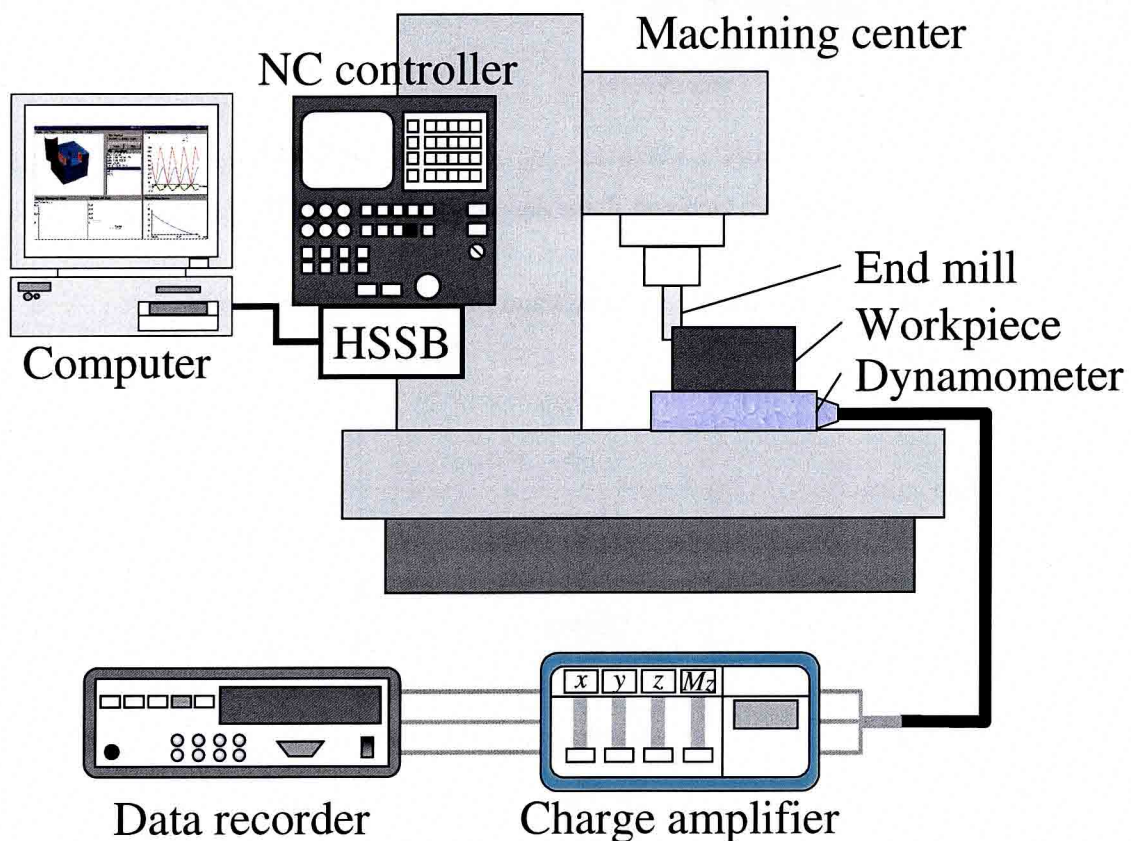


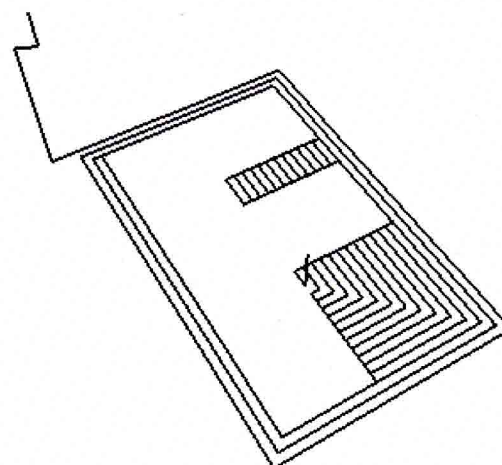
Fig.5.2.1 Experimental apparatus

5.3 予測情報に基づく自律加工

開発したシステムに基づき自律加工実験を行った。対象とする加工形状は、図 5.3.1(a)に示す通りである。また生成される工具経路は、図 5.3.1(b)に示す通り等高線工具経路である。ただし、工具経路は加工形状のモデルを基に、加工を行いながら実時間で生成されるものである。この加工においては、開発したシステムを用いて荒加工を行わせると想定し切削力のみを予測を行うことにした。また切削力の最大値は 600N、最小値は-600N とした。削り始める際に設定した切削条件（初期切削条件）、使用した工具、被削材は表 5.3.1 に示す通りである。



(a) Machined shape



(b) Generated tool path

Fig.5.3.1 Machined shape and generated tool path

Table 5.3.1 Workpiece, end mill and Initial cutting conditions

Workpiece	Cast iron (FC250)	
End mill	Material	Carbide
	Number of flutes	2
	Diameter [mm]	10
	Helical angle [deg.]	30
Cutting conditions	Cutting direction	Down
	Radial depth of cut [mm]	2.5
	Axial depth of cut [mm]	8
	Spindle speed [rpm]	2500
	Feed rate [mm/min]	200

図 5.3.2 に加工中に指令された送り速度の時間に対する変化について示す。図を見ても分かるように、VMSim による切削力の予測結果に基づき、加工状況に合わせて送り速度を調整しているのが分かる。ただし自律加工を行うに当たり、送り速度の最大値を 1000 mm/min としているため、エアカット状態においては、切削力が 0 になるので送り速度が 1000 mm/min になっている。さらに送り速度の計算は、3. 5. 3 節で述べた方法を用いた。自律加工を実現するためには、計算時間が重要要素となるが、今回の自律加工実験においては、送り速度の計算時間は、最大で約 18ms、平均で約 4ms であった。将来的に、実際の加工状況のフィードバックを活用することを考えれば、現在の計算処理速度はまだ不十分と考えられる。しかし今後のコンピュータの性能向上を考えれば、十分に自律加工は実現可能と予想される。

次に図 5.3.3～図 5.3.5 に切削力の予測結果と計測結果を示す。図をみれば分かるように予測結果と実験結果は切削力の傾向が一致しているのが分かる。場所によって切削力が予測結果よりも大きくなっているが、これは 3. 5 節で説明したように、送り速度の変化の影響で、指令値通りの送り速度になっていないためと考えられる。この実験により、開発したシステムを用いれば、加工と並行して加工状態を予測し、その結果に基づいて柔軟に切削条件を決定できることが分かった。

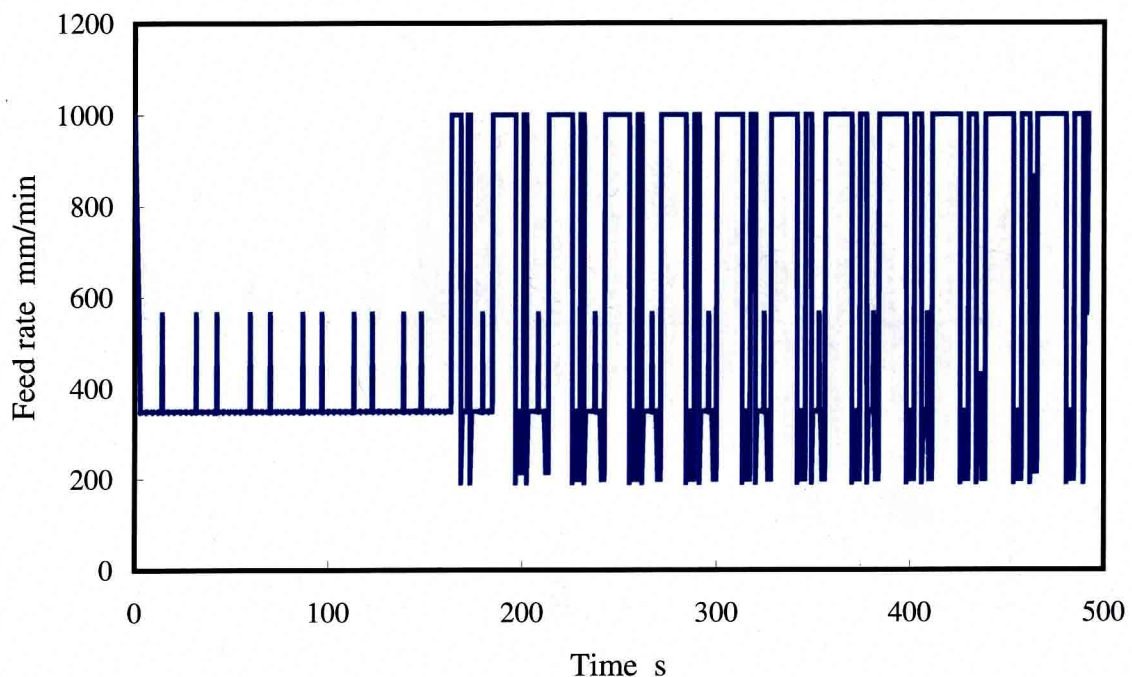


Fig.5.3.2 Commanded feed rate value

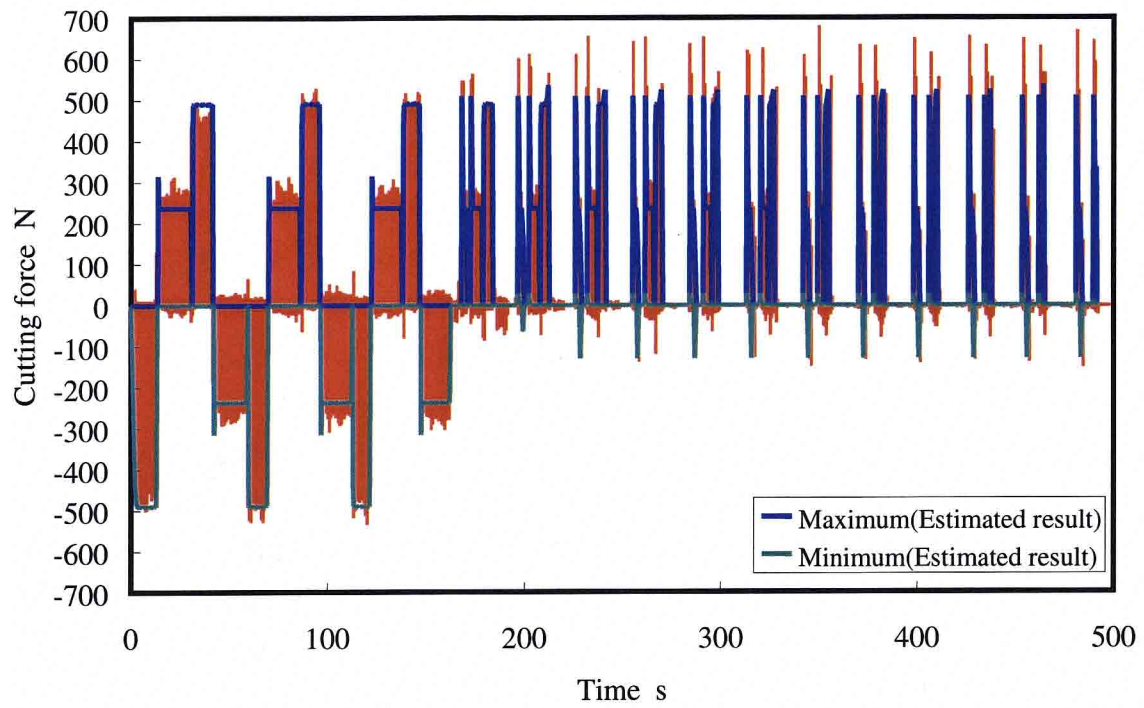


Fig.5.3.3 Comparison of estimated and measured cutting force along X axis

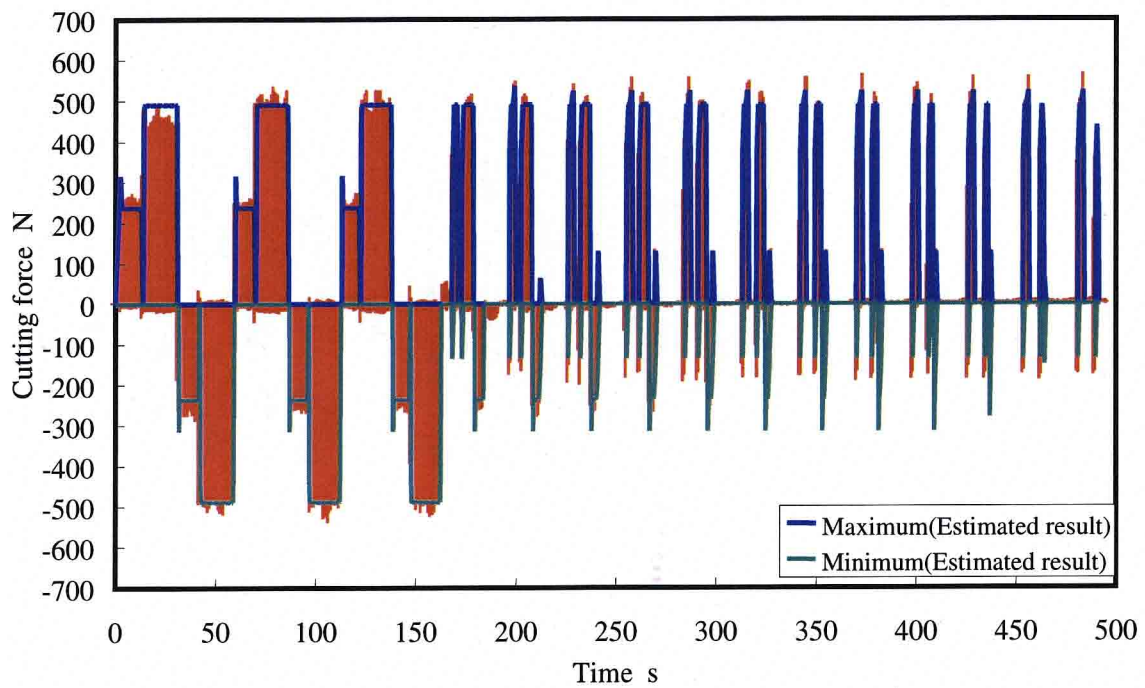


Fig.5.3.4 Comparison of estimated and measured cutting force along Y axis

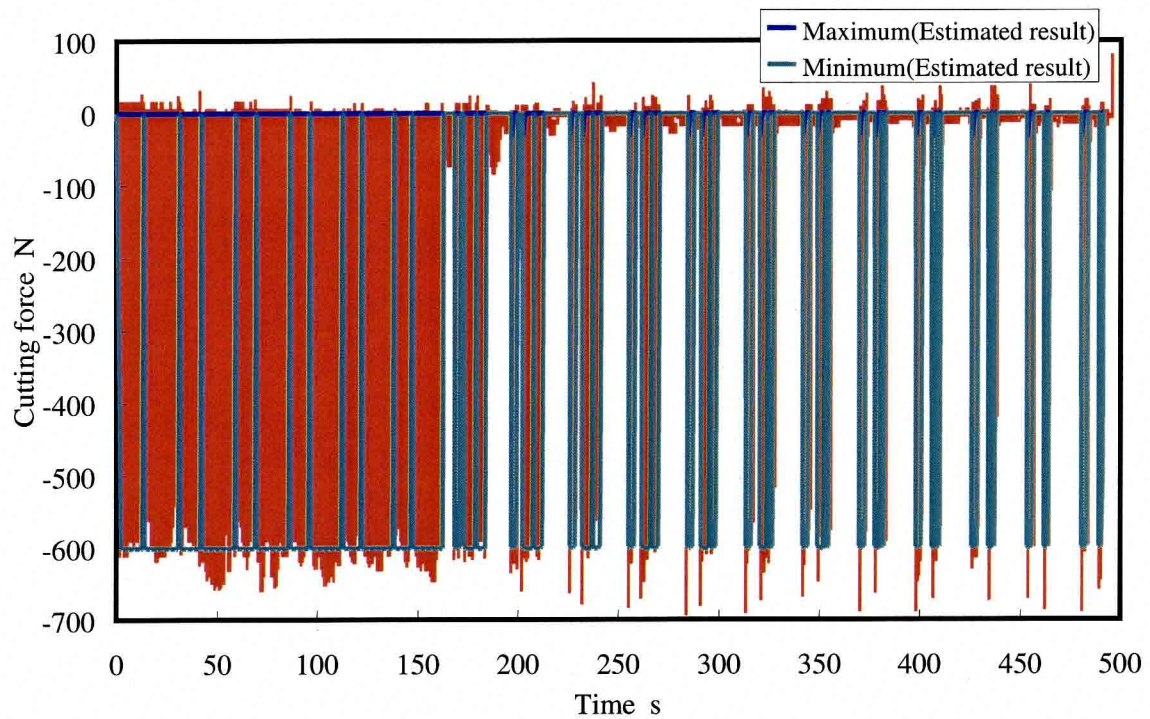


Fig.5.3.5 Comparison of estimated and measured cutting force along Z axis

5. 3 まとめ

加工状態を予測し切削条件の決定を行うことができる VMSim と実時間で工具経路を生成することができる IP_TPG を統合し、自律加工実験を行った。その結果、実時間で加工状態を予測し、加工と並行して加工指令を生成できることを確認し、自律加工の可能性を示した。

6. 結論と展望

6.1 結論

本研究は、被削材と製品モデルから自ら考えて加工を行う自律型・知能型工作機械の提案、その実現に必要な加工工程を予測するシミュレータの開発と自律加工の実現を目的に進められた。

以下に本研究で得られた結論を示す。

第2章では、次世代の工作機械に求められる機能を明らかにし、4つの機能ブロック (Management, Prediction, Observation, Strategy) からなる自律型・知能型工作機械 (AIMac) の概念とシステム構成を提案した。また、各機能ブロックが果たすべき役割とブロックを構成する各モジュール間の情報の流れを明らかにした。

第3章では、パーソナルコンピュータ上でスクエアエンドミルの加工工程を予測するヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim) について説明し、その構成要素である形状シミュレータと物理シミュレータについて述べた。この VMSim により NC データと工具・被削材情報、各種係数から加工中の瞬間切削力や加工誤差を推定できるようになった。さらに VMSim の予測情報を用い、加工に対する要求を満たすように送り速度を修正する方法を示し、加工実験を行って、その有効性を確認した。

第4章では、加工面を格子分割して、矛盾なく加工格子を連続して除去できるようなアルゴリズムの提案を行い、インプロセス工具経路生成システム (IP_TPG) について説明した。このシステムにより、荒加工用の等高線と走査線の工具経路を実時間で生成できるようになった。また加工トラブルに対しては、工具経路を柔軟に修正し、矛盾することなく続けて加工を行う方法について述べた。

第5章では、開発した VMSim と IP_TPG を統合して実際に加工実験を行った。その結果、実時間で加工状態を予測し、加工と並行して加工指令を生成できることを確認し、自律加工の可能性を示した。

6. 2 展望

6. 1 節で示した本研究の結果から、これからの展望の述べる。

- ・現在の VMSim の評価項目は、切削力と加工誤差であるが、切削温度や工具摩耗、表面粗さ、びびり振動を予測するシミュレーションモデルを構築し、検証実験を行ってモデルの有効性を確認し、Prediction ブロックを完成させる。
- ・IP_TPG や VMSim の送り速度修正機能以外の Strategy ブロックを完成させる。具体的には、実加工のフィードバックを組み入れた際の修正方法を組み込み、加工状況に応じた切削条件の決定を可能にしていく。
- ・その他のブロック、主に工程管理を行う Management ブロック、加工工程の診断を行う Observation ブロックの開発を行い、AIMac を完成させる。
- ・さらに工作機械の性能を十分に引き出すためには、工作機械自身の熱変形に対処する技術が必要である。この熱変形は、周囲の条件などにより不規則な挙動をするので、長い間解決できていない問題である[6-1]。今後、熱変位の有効的な補正手法の開発が期待される。提案した AIMac と新たな熱変位補正手法を統合することにより、よりレベルの高い加工を目指していく。

<参考文献>

第1章 緒言

- [1-1] (財)大阪科学技術センター金型データベース化調査委員会, 金型製作のノウハウのデータベース化に関する調査報告書, 1999.
- [1-2] 国際金属加工機械展(インターメックス'99)先端技術フォーラム, 新世紀の生産システム, (社)日本機械学会, 日刊工業新聞社, 1999.
- [1-3] Yamazaki, K., Hanaki, Y., Mori, M. and Tezuka, K., Autonomously Proficient CNC Controller for High Performance Machine Tool Based on An Open Architecture Concept, Ann. of the CIRP, Vol.46/1, pp.275-278, 1997.
- [1-4] Yamazaki, K., Kawahara Y., Jeng J. and Aoyama, H., Autonomous Process Planning with Real Time Machining for Productive Sculptured Surface Manufacturing Based on Automatic Recognition of Geometric Features, Annals of the CIRP, Vol.44/1, pp.439-444, 1995.
- [1-5] Mitsuishi, M., Nagao, T., Ohta, T. and Okabe, H., A Practical Machining Condition Determination Strategy Using Multi-Axis Force Information, Ann. of the CIRP, Vol.45/1, pp.373-376, 1996.
- [1-6] Mitsuishi, M., Nagao, T., Okabe, H. and Katsuya, M., An Open Architecture CNC CAD-CAM Machining System with Data-Base Sharing and Mutual Information Feedback, Ann. of the CIRP, Vol.46/1, pp.269-274, 1997.
- [1-7] 佐藤智典, 垣野義昭, 松原 厚, 藤嶋 誠, 西浦 勲, 鎌谷康史, 知能化工作機械によるドリル加工制御に関する研究(第1報)一切削条件の決定方法一, 精密工学会誌, Vol.66, No.8, pp.1270-1274, 2000.
- [1-8] 藤嶋 誠, 垣野義昭, 松原 厚, 佐藤智典, 西浦 勲, 知能化工作機械によるドリル加工に関する研究(第1報)一工具の異常監視と加工能率の向上一, 精密工学会誌, Vol.66, No.11, pp.1792-1796, 2000.
- [1-9] Altintas, Y. and Munashinghe, W. K., A Hierarchical Open-Architecture CNC System for Machine Tools, Ann. of the CIRP, Vol.43/1, pp.349-354, 1994.

- [1-10] Business Justification of Open Architecture Control, White Paper V1.0 Posted April 8, 1999.
- [1-11] Pritchow, G., Daniel, Ch., Junghans, G. and Sperling, W., Open System Controllers – A Challenge for the Future of the Machine Tool Industry, Ann. of the CIRP, Vol.42/1, pp.449-452, 1993.
- [1-12] EU Esprit project, IDAS-OSACA (Information dissemination and awareness actions for Osaka), <<http://www.cordis.lu/esprit/>>.
- [1-13] GM Powetrain Group Manufacturing Engineering Controls Council, Open, Modular Architecture Controls at GM Powertrain -Technology and Implementation-, 1996.
- [1-14] Matsuka, H. and Sawada, C., Japanese PC-based Open Control Systems for Manufacturing Equipment, Int. J. Jpn Soc. Prec. Eng., Vol.30, No.3, pp.204-209, 1996.
- [1-15] Official STEP-NC page, <<http://www.step-nc.org/>>.

第2章 自律型・知能型工作機械 (AIMac)

- [2-1] Kunimitsu, K., Autonomous Machining Operation Planning (AMOP) for True-CNC, Proceedings of the True-CNC'99, 1999.
- [2-2] Gainnes, D. M. and Hayes, C. C., CUSTOM-CUT: a customizable feature recognizer, Computer-Aided Design, pp.85-100, 1999.
- [2-3] Amnuay SAE-TANG, 井越 昌紀, 青村 茂, 荒井栄司, フィーチャループを用いた立体的な加工形状特徴の認識, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.607, pp.1021-1028, 1997.
- [2-4] Yan. X., Yamazaki, K. and Liu, J., Extraction of milling know-how from NC program through reverse engineering, Int. J. Prod. Res., Vol.38, No.11, pp2443-2457, 2000.
- [2-5] Stage, R., Roberts, C. and Henderson, M., Generating resource based flexible form manufacturing features through objective driven clustering, Computer-Aided Design, pp.119-130, 1999.
- [2-6] Xu., X. and Hinduja, S., Recognition of rough machining features in 2 1/2D components, Computer-Aided Design, Vol.30, pp.503-516, 1998.

- [2-7] Lee, K., Kim, T. J. and Hong, S. E., Generation of toolpath with selection of proper tools for rough cutting process, Computer-Aided Design, Vol.26, No.11, pp.822-831, 1994.
- [2-8] 井原 透, 曾 文胤, 松村 隆, 田中克幸, 伊藤 誼, 生産環境を反映した自動工程生成手法の提案, 精密工学会誌, Vol.61, No.11, pp1550-1554, 1995.
- [2-9] 太田昌孝, 竹内あきら, 大口考之, 応用グラフィックス, アスキー出版局, 1993.
- [2-10] 山岡 祥, Turbo C による 3D グラフィックス, 森北出版株式会社, 1995.
- [2-11] OpenGL Architecture Review Board Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo / 株式会社システムソフトエンジニアリング訳 : OpenGL Programming Guide (日本語版), アジソン・ウェスレイ・パブリッシャーズ・ジャパン株式会社, 1995.
- [2-12] 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎, 基礎切削加工学, 共立出版株式会社, 1984.
- [2-13] 藤村善雄, 実用切削加工法—第 2 版, 共立出版株式会社, 1995.
- [2-14] 森脇俊道, 社本英二, 高 大力, 杉原和郎, 切削力予測モデルに基づくフライス加工状態の認識 (第 1 報 最適化手法によるモデル内パラメータの同定と工具摩耗量の推定), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No.586, pp.418-424, 1995.
- [2-15] Li, H., Dong, Z. and Vickers, G. W., Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis, Computer-Aided Design, Vol.26, No.11, pp.787-795, 1994.
- [2-16] 神谷昌秀, 島田元浩, 鈴木 裕, 横関俊介, 倣い加工シミュレーションに基づく CAM システムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No.590, pp.307-312, 1995.
- [2-17] 神谷昌秀, 佐藤裕一, 林 朗弘, 鈴木 裕, 倣いシミュレーションに基づく CAM システムの開発 (境界表現法への適用とその高能率加工), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.63, No.608, pp.1378-1384, 1997.
- [2-18] 入口健二, 加藤清敬, 曲面細分割による工具経路生成方法, 精密工学会誌, Vol.64, No.11, pp.1618-1622, 1998.

- [2-19] Takahashi, H. and Kanai, S., A Study on Virtual Reality of NC programming for Free-Form Surfaces, Int. J. Jpn Soc. Prec. Eng., Vol.30, No.2, pp.177-182, 1996.
- [2-20] Lin, Y. J. and Lee, T.S., An adaptive tool path generation algorithm for precision surface machining, Computer-Aided Design, Vol.31, pp.237-247, 1999.
- [2-21] 鈴木 裕, 山崎和雄, 星鐵太郎, 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第 2 報), 精密工学会誌, Vol.53, No.12, pp.142-148, 1987.
- [2-22] 鈴木 裕, 黒田 豊, 坂本正史, 元村直行, 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第 3 報), 精密工学会誌, Vol.57, No.3, pp.2900-2905, 1994.
- [2-23] 高橋百利, 型のトライレス化, 精密工学会誌, Vol.63, No.9, pp.1231-1235, 1997.
- [2-24] Koren, Y. and Masory, O., Adaptive Control with Process Estimation, Ann. of the CIRP, Vol.29, No.1, pp.281-285, 1981.
- [2-25] 白瀬敬一, 沢田 篤, 若松栄史, 荒井栄司, 岩田一明, 切削力適応制御に基づく NC プログラムレス旋削加工の試み, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.643, pp.1031-1036, 2000.

第 3 章 ヴァーチャルマシニングシミュレータ (VMSim)

- [3-1] 岩田一明, 伊藤 誼, 木村文彦, 大場史憲, 高田祥三, 仮想生産システムのモデリングと分散シミュレーションに関する研究, 平成 6 年度科学研究費補助金 (研究科報告書), 1995.
- [3-2] Lin, E., Minis, I., Naus, D. S. and Regli, W. C., The Institute for Systems Research (ISR) CIM Lab. Virtual Manufacturing Home Page, March 25, 1997.
<<http://www.isr.umd.edu/Labs/CIM/virtual.html>>
- [3-3] Marinov, V., A Generic Virtual Machining Process, Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Manufacturing Process & Systems, pp.203-208, 2000.
- [3-4] Maekawa, K., and Childs, T. H. C., Development of Three Dimensional Virtual Machining Systems (3D-VMS) for Intelligent Production, Rapid Product Development, Chapman & Hall, pp.169-178, 1997.

- [3-5] Wang, W. P. and Wang, K. K., Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids, IEEE CG&A, Vol.6, No.12, pp.8-17, 1986.
- [3-6] S. Takata, M. D. Tsai, M. Inui and T. Sata, Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model, Annals of the CIRP, Vol.38/1, pp.417-420, 1989.
- [3-7] 高田祥三, 山崎好幸, 切削状態予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No.581, pp266-272, 1995.
- [3-8] 朝比奈奎一, 横山哲男, 古川勇二, 加工精度予測可能なパーソナル CAD/CAM システムの開発 (エンドミルによる端面加工の場合), Vol.61, No.588, pp.265-271, 1995.
- [3-9] Leu, M. C., Lu, F. and Blackmore, D., Simulation of NC Machining with Cutter Deflection by Modeling Deformed Swept Volumes, Ann. of the CIRP, Vol.47/1, pp.441-446, 1998.
- [3-10] 乾 正知, 板尾良輔, NC 加工結果の高速な可視化手法—離散的に表現された切削加工面の高品位な表示—, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1043-1047, 2000.
- [3-11] 藤尾三紀夫, 柳下福蔵, 鈴木 裕, Boundary-Map データ構造に基づく CAD/CAM システムの開発, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1048-1052, 2000.
- [3-12] MÄRTTI MANTYLÄ, AN INTRODUCTION TO SOLID MODELING, COMPUTER SCIENCE PRESS, 1988.
- [3-13] Isobata, Y., Yamazaki, K. and Tsutsumi, M., A Study on Real-Time Tool Utilization Analyzer Using Three Dimensional Machining Simulation, MM21 Proceeding, pp427-432, 1997.
- [3-14] Smith, S. and Tlustý, J., An Over View of Modeling and Simulation of Milling Process, Trans of ASME, J. Eng. for Ind., Vol.113, No.2, pp.169-175, 1991.
- [3-15] 白瀬敬一, エンドミル加工における切削モデルとシミュレーション, 先端加工, Vol.16, No.1, pp.62-73, 1997.
- [3-16] Budak, E. and Altintas, Y., Flexible Milling Force Model for Improved Surface Error Predictions, Proceedings of the 1992 Engineering System Design and Analysis, Istanbul, Turkey, ASME PD-Vol.47-1, pp.89-94, 1992.

- [3-17] Kops, L. and Vo, D. T., Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliance: Ann. of the CIRP, 39, 1, pp.93-96, 1990.
- [3-18] 日本工業標準調査会, 日本工業規格 (JIS B6311~JIS B6314), 日本規格協会.
- [3-19] Madison, J., CNC Machining Handbook –Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures-, Industrial Press Inc, 1996.
- [3-20] 閻 喜仁, 白瀬敬一, 河端 裕, 平尾政利, 安井武司, マシニングセンタの生産性向上に関する研究 (第1報) —NC プログラムシミュレータによる生産性評価—, 精密工学会誌, Vol.63, No.7, pp.1044-1048, 1997.
- [3-21] Yamazaki K., Kojima N., Sakamoto C. and Saito T., Real-Time Model Reference Adaptive Control of 3-D Sculptured Surface Machining, Ann. of the CIRP, 40/1, pp.479-482, 1991.
- [3-22] Furukawa, N., Real Time Machining Optimization with Dynamic Machining Operation for TRUE-CNC, Proceeding of the TRUE-CNC'99 Annual Meeting, 1999.
- [3-23] Takata, S., Generation of a Machining Scenario and Its Applications to Intelligent Machining Operations, Ann. of the CIRP, Vol42/1, p.531-534, 1993..

第4章 実時間工具経路生成 (IP_TPG)

- [4-1] 水垣善夫, 山田秀彦, 坂本正史, 格子点空間におけるロボットの障害物回避経路自動生成の一手法, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.55, No. 514, pp.1399-1405, 1989.
- [4-2] 呉 勇周, 横田和隆, 尾崎功一, 佐藤啓仁, 山本純雄, 粒子群の密集についての認識とその評価, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.609, pp.1528-1532, 1997.
- [4-3] Wolfram, S., Universality and complexity in cellular automata, Physica D, Vol.10, pp.1-35, 1984.
- [4-4] 高橋磐朗, 早迫亮一, 自己増殖オートマトンの設計と試作, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.2, pp.238-248, 1990.

第5章 AIMac システムによる自律加工

- [5-1] 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), Vol.66, No.644, pp.1368-1373, 2000.

第6章 結言

- [6-1] 長島一男, 上田俊弘, 百地 武, 熱と遠心力により生ずる工作機械主軸の変位とその補償方法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.636, pp.3438-3443, 1999.

<研究業績>

投稿論文

1. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H. and Arai, E., In-process Tool Path Generation for Basic Autonomous Milling, Int. J. Jpn Soc. Prec. Eng., Vol.33, No.3, pp.218-219, 1999.
2. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H. and Arai, E., Pre-Process Evaluation of End Milling Operation Using Virtual Machining Simulator, Int J. Jpn Soc. Mech. Eng., Series C, Vol. 43, No.2, pp492-497, 2000.
3. 成田浩久, 白瀬敬一, 若松栄史, 荒井栄司, ヴァーチャルマシニングシミュレータを用いたNCプログラムの評価と修正, 日本機械学会論文集(C編), 66, 648, pp.2871-2876, 2000.
4. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H., Tsumaya, A. and Arai, E., Real Time Cutting Simulation System for Autonomous and Intelligent Machine Tools, Int. J. Prod. Res., (掲載予定).

Full Paper 査読付き国際会議

1. Shirase, K., Narita, H., Wakamatsu, H., Arai, E. and Iwata, K., PC Based Virtual Machining Simulator for Autonomous and Intelligent Machine Tool, Proceedings of the 1998 JAPAN-U.S.A Symposium on Flexible Automation, pp.1281-1288, 1998.
2. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H. and Arai, E., Pre-process Evaluation of Machining Accuracy Using Virtual Machining Simulator, Proceedings of the 2nd International Workshop on Strategic Knowledge and Conceptual Formation, pp271-280, 1999.
3. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H. and Arai, E., Pre-Process Evaluation and Modification of NC Program Using Virtual Machining Simulator, Proceedings of the 2000 JAPAN-U.S.A Symposium on Flexible Automation, pp.593-598, 2000.

その他の国際会議

1. Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H., Tsumaya, A. and Arai, E., Real Time Cutting Simulation System for Autonomous and Intelligent Machine Tools, Proceedings of the 16th International Conference on Production Research (ICPR-16), CD-ROM, 2001.

<謝 辞>

本研究論文の執筆を終えるにあたり、終始熱心な御指導、御鞭撻を賜ると共に論文の主査を引き受けて頂いた荒井栄司教授に心から御礼申し上げます。またお忙しい中、論文の副査を引き受けて頂き、本論文をまとめる際に貴重な御助言をして頂きました座古 勝教授、三好隆志教授、高野直樹助教授、白瀬敬一助教授に心から御礼申し上げます。特に金沢大学在学中より、研究テーマの設定から研究の遂行に至るまで、長年に渡り多大な御尽力を賜ると共に、暖かく寛大な心で見守って頂いた白瀬敬一助教授に心から感謝の意を表します。そして常に温情を持って御助言、御激励して頂きました若松栄史助手ならびに妻屋 彰助手に深く感謝いたします。

また AIMac のシステム提案に際して、熱心に御討議して頂き、有益な御助言をして頂きました山崎和雄カリフォルニア大学教授ならびに IMS-Mechatronics Lab.関係各位に心から御礼申し上げます。

さらに、形状測定装置を使用させて頂きました大阪大学大学院 工学研究科・旧岩田研の方々ならびに研究を進める上で貴重な御助言をして頂きました寺本孝司助手に心から御礼申し上げます。

また、本研究の推進、論文作成にあたり終始ご協力頂いた同研究室の大学院生である森脇信康修士、八木淳一修士、中本圭一修士、尺土安示学士、寺本 亮学士、本庄 範学士、池田 理学士、河北壮平学士、田中裕介学士、塚田 陽学士、時岡章一学士、森津 良学士、本学 4 年生である酒井崇樹氏、武下真典氏、十河陽平氏、深田康平氏、森田暁子氏、内藤朋成氏ならびに同研究室の修了生、卒業生諸氏に厚く御礼申し上げます。

この大阪大学における 3 年間の研究活動は、家族の理解により達成できたものであり、あらためて感謝の意を表します。

最後に、御力添え頂いた皆様の御健康と今後のさらなる御活躍を祈り、謝辞とさせていただきます。

2001 年 12 月

成田浩久