

多軸力情報を用いた
知能化生産システムの研究

劉 澤 一

①

多軸力情報を用いた
知能化生産システムの研究

平成 5 年 12 月 20 日

割 澤 伸 一

目次

第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究範圍與對象	2
1.3 研究地點與時間範圍	3
1.4 研究資料與方法	4
第二章 研究區域背景與研究區域之自然環境背景	27
2.1 研究區域之自然環境背景	27
2.2 研究區域之人文環境背景	30
2.3 研究區域之社會環境背景	32
2.4 研究區域之經濟環境背景	34
2.5 研究區域之政治環境背景	36
2.6 研究區域之文化環境背景	38
2.7 研究區域之教育環境背景	40
2.8 研究區域之醫療環境背景	42
2.9 研究區域之交通環境背景	44
2.10 研究區域之治安環境背景	46
2.11 研究區域之宗教環境背景	48
2.12 研究區域之其他環境背景	50
第三章 研究區域之社會環境背景	53
3.1 研究區域之人口背景	53
3.2 研究區域之性別背景	55
3.3 研究區域之職業背景	57
3.4 研究區域之教育背景	59
3.5 研究區域之醫療背景	61
3.6 研究區域之交通背景	63
3.7 研究區域之治安背景	65
3.8 研究區域之宗教背景	67
3.9 研究區域之其他背景	69
第四章 研究區域之自然環境背景	71
4.1 研究區域之地形背景	71
4.2 研究區域之氣候背景	73
4.3 研究區域之水文背景	75
4.4 研究區域之土壤背景	77
4.5 研究區域之植被背景	79
4.6 研究區域之動物背景	81
4.7 研究區域之其他自然環境背景	83
第五章 研究區域之人文環境背景	85
5.1 研究區域之歷史背景	85
5.2 研究區域之文化背景	87
5.3 研究區域之教育背景	89
5.4 研究區域之醫療背景	91
5.5 研究區域之交通背景	93
5.6 研究區域之治安背景	95
5.7 研究區域之宗教背景	97
5.8 研究區域之其他人文環境背景	99

1 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 従来の研究	6
1.3 本研究の目的と意義	13
1.4 本論文の概要	15
2 センサ情報統合型知能化生産システムの概念と構成	17
2.1 従来の生産システムとその問題点	19
2.2 センサ情報統合型知能化生産システムの設計思想	22
2.3 センサ情報統合型知能化生産システムの基本構成	29
2.3.1 マルチセンサ融合型加工機械	32
2.3.2 実時間加工状態判定	38
2.3.3 加工に関する知識	39
2.3.4 センサ情報帰還型CAD/CAM	42
3 加工の物理現象の解析	44
3.1 加工の物理現象の重要性	45
3.2 エンドミル加工の物理モデル	47
3.2.1 従来の研究	47
3.2.2 切削抵抗の基礎式	48
3.2.3 未知パラメータの計算方法	54
3.2.4 計算結果	58
3.3 タップ加工の物理モデル	64
3.3.1 切削機構の解明	65
3.3.2 未知パラメータの決定	79
4 実時間加工状態判定	96
4.1 従来研究	97
4.2 力ベクトルの軌跡	100
4.3 力ベクトルの軌跡を用いた加工状態判定法	104
4.3.1 エンドミル加工のびり振動の実時間判定	104
4.3.2 エンドミル加工の摩耗状態の監視	110
4.4 考察	114

5 加工に関する知識	115
5.1 加工に関する知識の考え方	116
5.2 実験的安定限界線図に基づく加工に関する知識の整理	119
5.2.1 びびり振動に関連する従来の研究	119
5.2.2 実験方法	122
5.2.3 実験結果	124
5.2.4 エンドミル加工の実験的安定限界線図の説明	139
5.3 薄物部品の加工	141
5.3.1 従来の研究	141
5.3.2 実験方法	143
5.3.3 薄物加工の切削過程	147
5.3.4 変速切削法による制御	159
5.3.5 薄物加工の理論解析	163
6 マルチセンサ融合型加工機械の構成	180
6.1 外部制御可能な加工機械	181
6.2 工作物側加工反力検出センサ(6分力テーブル)	185
6.2.1 工作物側加工反力検出センサに要求される機能	185
6.2.2 6分力テーブルの構造と特性	186
6.3 フェイルセーフ・メカニズム(フェイルセーフ・テーブル)	191
6.3.1 フェイルセーフ・メカニズムの原理	192
6.3.2 フェイルセーフ・テーブルの構造	195
6.3.3 カラー変位特性実験	199
6.4 実時間制御器	205
6.4.1 実時間制御器に要求される機能	205
6.4.2 ハードウェア	207
6.4.3 オペレーティングシステム	209
7 自律型加工機械の実現	210
7.1 自律型加工機械のシステム構成	211
7.2 加工条件の修正規則	215
7.3 加工条件の自己学習機能	217
7.4 部品形状の作成と工具経路の生成	220
7.5 自律加工実験	226
7.5.1 加工条件の自己修正機能を用いない加工	226

7.5.2 多軸力情報を用いた自律加工実験	232
7.5.3 多軸力情報と形状情報を用いた自律加工実験	238
7.6 考察	244
8 総括と展望	246
9 結論	251
謝辞	
参考文献	

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

本研究は、単品生産において製品を短期間に精度良く加工するために、加工中に発生する多軸力情報を用いた加工機械の知能化を試みたものである。具体的には、加工において発生する加工力を多軸力センサによって実時間で獲得し、多軸力情報をもとに実時間で加工状態を判定し、その結果にしたがって加工条件を修正し、常に加工状態を良好に保ち、その過程で得られた情報を知識として蓄積することにより学習機能を有する知能化生産システムの構築を試みた。

そこでまず本研究の背景について述べる。

生産システムの自動化を最初に実現したのは、1946年にアメリカのフォード社が提案したコンベアシステムのオートメーションである。これは作業を分割することによって自動化を実現するというもので、生産量を追求したものであった。生産システムの中核ともいえるNC(Numerical Controlled)工作機械は1949年にマサチューセッツ工科大学で開発され、工作機械の主要な運動が人手から離れてゆくことにより複雑な形状を精度よくそして効率的に加工することができるようになった。

1970年代に入ってマイクロプロセッサの発達とともにそれまでのNCからCNC(Computer Controlled NC)に変わり、APT(Automatic Programming Tool)のような、自動プログラミングシステムも開発された。さらにNC工作機械においては異種の加工が複合化されマシニングセンタという新しい工作機械が登場し、多くの作業を自動化することが可能となった。一方工作機械を自動的に動かすためのNCプログラムの作成は非常に時間のかかる作業となってきたため、コンピュータを援用したCAD(Computer Aided Design)やCAM(Computer Aided Manufacturing)が開発された。このような技術的背景とともに社会的背景にも、(i)熟練労働者の高齢化や数の減少、(ii)労働環境の改善、(iii)生産性の向上、(iv)製品の品質の均一性の向上、といったことがあって、生産工場は次第に自動化および無人化の方向に発展していった。このような発展の中で個々の技術で完全なものではなかったが、大量生産システムを大きく成功させることができた。

しかしながらその後、消費者の要求が多様化してきたために、それまでの生産量を中心とした管理あるいは開発から、中品種中量生産や多品種少量生産をより経済的にかつより効率的に行える生産システムが必要となり、FMS(Flexible Manufacturing System)が本格的に導入されるようになった。タイミングよく生産を行うために、製品設計が効率よく行われなければならないが、生産現場においても、生産するための材料や治具、加工データがタイミングよく供給される必要がある。そのためコンピュータを利用して複数のNC装置とを結び付け、加工データ

の授受や加工の制御・管理を効率的に行うようにシステムが構築された。

最近では特に「コンカレントエンジニアリング」という言葉が注目を浴びている[1, 2, 3, 4, 5, 6]。これは1989年にアメリカにおいて作り出された言葉であるが、製品の設計および製造に関するさまざまな活動、特に開発段階での活動をできる限り平行して行うことによって、リードタイムをできる限り短縮し、高品質で低価格の製品を消費者に提供するための方法論である。それまでのFMSのように個々の自動化されつつある技術をコンピュータによって単に結び付けていくというアプローチをもっと押し進め、情報の伝達を密に行うことによってできるだけ多くのプロセスが平行的に遂行されるように、機械設備だけでなく人間も含めて様々な形で支援する統合システムである。そのなかで設計・加工に関しては、設計部門と加工部門が情報交換を容易にすることによって、短期間に精度よく試作品あるいは製品を作り上げることを目標とする「ラビッド・マニファクチャリング」という言葉のもとにさまざまな技術の確立が求められている。各プロセスができる限り平行して実行されるためには、集中管理体制よりも分散管理体制のほうがよい。できる限り各プロセスが自律して作業できるほうがよい。加工について考えれば、製品形状の設計はCADの中で行われ、工具経路はCAMによって決定されるわけだが、加工条件の決定については、個々の加工機械の状態を把握していなければおおよそ決定できても最適であるかどうかは分からない。それならば、工具経路の情報を与えたら、あとは個々の加工機械が自分の状態に応じて条件を決定、修正するほうが効率がよいし、品質の良いものを作り出す事ができる。

こうして生産設備が自動化のレベルを高め、そこから得られる効果への期待が大きくなればなるほど、設備を稼働させるための生産準備に大きなウェイトがかかってきている。これまでも生産準備の自動化に関して、コンピュータ援用工程設計システム、自動プログラミングシステム、生産管理システムなどが開発されてきた。このようなシステムは汎用的なシステムとして開発されたものである。一方工程設計は生産する品目や生産設備に大きく関連することである。NCの自動プログラミングシステムであっても、加工は形状情報のほかに加工に関する情報や知識が必要不可欠であり、このような情報は熟練者の経験や勘、ノウハウに依存するところが大きい。そのためシステムが支援できることは少なく結局人手に頼るところが大きい。工程設計など生産準備に関わる作業の支援を本格的に行なうには、熟練者の経験や知識をいかに変換し蓄積していくかが大きな問題となっている。また実際に部品を加工する場合に、加工する状態が前提とした条件とすべて一致するとは限らず、機械を動かしながら状態をみて加工条件を設定しなおすといったことがよく行われる。特に多品種少量生産においては、そのような準

備に要する時間が全体に占める割合が大きくなっている。また多品種であるために加工状態をあらかじめ予測することが難しくなっている。

例えば加工の高精度化の観点から考えると、これまで加工機械はその剛性を上げることにより精度を上げてきた。しかしながら、要求される精度が上がるにつれ精度を剛性のみによって確保することが難しくなっている。工作機械は力だけでなく熱によっても変形しているという物理現象を考えるとこのことが明らかになってくる。汎用の小型のマシニングセンタでは、一日の温度変化によって工具先端部の位置が $20\mu\text{m}$ ～ $50\mu\text{m}$ も変位している。また最近の部品の高機能化の要求から工作物の軽量化が起こり、その結果薄物化の傾向がある。このような薄物加工においては、たとえ工作機械の剛性が高くなっても、工作物側の剛性が低いために精度を得ることは不可能であり、実際の状態を見ながら動作を修正することが重要となる。このような場合にはあらかじめ機械の状態を予測することは不可能であり、加工機械自身が自らの状態を知り動作を決定することが必要不可欠といえる。

こうした準備や加工条件の設定の自動化の要求は研究機関や大学などにおいてもおこっている。製品の開発や研究において、シミュレーションを行なう場合と必要の実験装置を製作して実験を行なう場合がある。現象を支配する物理法則が明らかであれば、シミュレーションが有効であるが、それが未知である場合には実験が不可欠である。しかしながら実験装置の設計から、製作、組立に至るまでには時間を要する。特に設計者(学生や製品開発を担当する者など)にとっては、実験装置や製品の試作品などをすぐに製作できることは、製作期間を短縮できるという効果だけでなく、発想がすぐ具現化されることによって、新たな発想が期待される。

このような背景を鑑みて、ハードウェア技術の発達とコンピュータ技術の進歩によって生産システムは人間の手から離れていく傾向にあるわけだが、このことは同時に人間がもつさまざまな能力を失っていることも確かである。生産システムが現在のように自動化、無人化されるまでに、人間が多くの経験と知識を獲得しそれによって製品の付加価値を高めてきた。今後消費者の要求する製品をできるだけ速く、高品質で低価格のものを提供するために、生産システムとして現在要求されていることは、個々の生産設備が(i)自己診断機能や(ii)自己修復機能、そして(iii)自己学習機能を有する自律機械として実現されることであろう。各機械が自らの状態を把握するのに必要なセンシング機能を有し、これらを駆使することにより自らの状態を監視、判断する機能により、つぎに何をすべきか判断可能となる。さらに異常が発生した場合には、システムを安全側に退避させた上で原因を取り除き、自動的に復帰できる保護機能が重要である。また作業の中で得

た多くの情報を整理することによって経験と学習を行い、その後の作業に反映させることによって柔軟性と発展性を期待することができる。

1.2 従来の研究

本研究はCAD/CAMにおける工程設計の自動化、加工機械における物理現象のモニタリングおよび適応制御、学習、知識獲得に関する研究と深く関連がある。そこでここではこれらについてこれまでになされてきた研究について概観する。

工程設計の自動化については、CADに入力された形状情報を加工において必要な情報にどのように変換するかが問題の一つとなっている。

若原らは、NC加工命令の自動生成について研究を行っている[7]。ここでは、NC加工命令を自動生成するためには、加工対象製品の幾何情報だけでなく、加工という観点から見た形状の持つ意味や技術情報も必要であると考え、加工向きプロダクトモデルを提案している。このモデルを用いて荒加工用命令を自動生成するシステムを試作し、その出力したNCデータにより、マシニング・センタで加工実験を行ない、その有効性を確認している。

松田らは、加工工程設計の自動化を試みる研究を行っている[8, 9, 10]。機械製品の生産システムにおける設計から製造への情報の流れについて考察し、設計と製造作業を統合することを試みている。製造側の入り口である自動工程設計システムが要求している入力情報の形状特徴表現をもつプロダクトモデルを生成するために、製品設計過程で用いる形状特徴モデリングシステムを提案・試作して、機能的機械部品については、設計と製造のリンクとして有効であることを確認している。さらに金型キャビティを例に工具径の決定、加工領域の自動抽出、切削順序の決定を行うシステムの試作を行っている。

安藤らは、設計対象の機能記述に基づいた設計・製造の統合化を試みている[11]。機械製品の生産における設計・製造過程の統合化の方法論が述べられている。CADの設計結果が製造向きのモデルに解釈された情報を中間製造情報と呼び、その情報の自動導出によって統合化を実現する。そのため、一般的な設計結果の表現である形状情報に加え、その形状を設計した意図、すなわち形状に与えたさまざまな機能をCADシステムに明示的に記述し、その記述内容から中間製造情報を導出する方法を提案している。

岩田らは、多品種少量生産のための動的工程設計について提案している[12]。彼らはJISにおける幾何公差および公差の定義に従い、機械製品の精度情報の記述に必要な項目を分析、整理し、製品モデルにおける精度情報の記述データ構造を提案している。さらに、複数に定義される精度情報の整合性を検証するとともに、精度の連接経路に沿って公差域を重畳する手法を開発している。これにより、製品モデルにおいて精度情報を統一的に取り扱える。

花田らは、ブロック形状部品について完全自動CAM処理を行うCAD/CAMシ

システムの開発を行っている[13, 14]。CADで設計した製品のデータを加工に必要な情報へ自動的に変換するために、加工形状指示によるCAD/CAMの手法を提案している。既存のパラメトリック形状によるCADの方式を、定義した切削方法を使って加工可能な形状のみに限定することにより、ブロック状部品の自動CAM処理を可能としている。これにより、多様なブロック状小部品に対する高度自動加工の可能性を示している。

他にもこれに関連した研究は多く行われているが[15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]、これらの研究の共通した概念は、製品モデル(Product Model)である。設計・生産の過程は、設計対象を表現する製品情報や、製造のための各種の制御情報の生成、変形、伝達、蓄積の過程であるが、従来は人間が図面を見ながら製造に必要な情報を取り出していた過程である。コンピュータに支援された現在の生産システムにおいて、設計部門と製造部門の間の情報変換は、リードタイムを短縮でき、情報の明確な記述とその蓄積によって効率の向上を期待できる。

以上は設計対象を製品モデルで記述することによって、加工工程設計や工具経路生成などの情報を自動的に生成できることを示している。一方加工する形状モデルの情報を工具経路生成のためだけでなく、発生する物理現象を予測するために利用しその結果をもとに加工条件を決定する研究がいくつか行われている。

旋削加工においては、加工形状を2次的に表現できることや切削機構が比較的簡単に表現できることから計算機内のモデルとして物理モデルのみをもつ場合が多かった。最近ではマシニングセンタによるフライス加工やエンドミル加工が急激に増加したために、旋削加工の場合と同様に加工の物理モデルを用いて切削力や振動の予測をする必要がでてきた。しかしながら特にエンドミル加工では加工形状が2.5次元あるいは3次元であり、切削機構が旋削加工に比べて非常に複雑であるために、容易には現象の予測が難しい。そのためCADに入力された形状情報とあらかじめ構築しておいた加工に関する物理モデルを用いて、加工する前に発生する物理現象を予測する研究が行われるようになってきた[23]。

Bertokらは、ソリッドモデリングシステムを用いて、切削トルクを予測するシステムと、このシステムを用いたNCデータの検証と、切削トルクの監視について報告している[24]。彼らは切削過程をモデリングシステムの中でシミュレートし、それによって得られた形状データを用いて切削トルクを計算している。計算モデルは、除去される体積と工具・工作物の接触面積をもとに、実験式を使って行っている。その結果数mmの誤差が許容されるダイキャスト金型の加工に適用可能であると述べている。

Thustyらは、工具経路の生成について形状モデルだけでなく予測される加工状

態としてびびりの発生を考慮したNCデータの生成手法について提案し、フライスによるポケット加工の簡単な例について適用している[25]。ポケット加工においては、方向やモードによって許容される切削深さが異なる。そこで要求される精度に対する基準を設定するための切削パラメータに関するデータ・ベースを、実験より獲得した動特性とシミュレーションによって構築した。このデータベースと加工効率を考慮して工具経路が決定される。

Altintasらは、ソリッドモデルに基づいた工具経路生成アルゴリズムのためのフライス加工のシミュレーションシステムについて研究している[26]。この研究では部品をCSG(Constructive Solid Geometry)によって表現し、工具経路に沿って工具のモデルと部品のモデルとの共通部分を計算することによって各瞬間の平均および最大切削力、部品の仕上げ面に残される最大変形量を予測するものである。このシステムによりフライスの送り速度のスケジューリングを行うことができるといふものである。

一方Tsaiらもフライスによるポケット加工のためのモデルベース工程決定システムについて研究している[27, 28]。ここでは工具経路と加工条件は、工作物の形状と加工工程の物理モデルによって決定されるとしている。工具経路はVoronoiダイアグラムにより生成され、最大の加工効率を達成する加工条件は、切削トルクとびびり振動、および加工誤差の物理モデルにより決定している。また良好な加工状態を維持するための工具経路アルゴリズムを提案し、角部における工具経路に適用している。

高田らは以上のような考え方を実現するにあたり、コンピュータ内においてもつべきデータ構造について、加工シナリオという考え方を提案し非常に整理している[29, 30, 31]。加工シナリオ(machining scenario)は、加工状態の変化を記述したもので、それは工具・工作物の接触面や切削力、加工誤差のような加工過程の特性値によって記述されている。これにより、加工前の加工条件の最適化、オンラインの適応制御、異常発生の監視および診断を行なうことができる。この論文の中では、加工シナリオのデータ構造を述べ、さらに効率良く信頼性のある加工データを生成したり、インテリジェントな加工操作を実現するのにどのようにして加工シナリオを利用すれば良いかが述べられている。

こうして設計情報を加工情報に自動的に変換したり、発生する物理現象を予測することによって加工条件を自動的に設定することが行われてきている。しかしながら加工現象は非常に複雑で多くのパラメータが関与しており、完全に予測することは現在の段階ではできていない。さらに、加工機械自身の状態の変化、工具状態の変化、切削中の工作物の形状の変化、あるいは加工機械を取り巻く環境

の変化によって発生する現象は複雑に変化し得る。そのため、加工中の物理現象をセンサで監視し加工異常を予知、検知すること、そしてその結果に応じて適応制御を行うことが必要である。

加工の物理モデルをもって、発生する切削力や振動などを予測したり適応制御を行なう研究は旋削加工において古くから多く研究されている [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]。旋削加工においては加工条件が一定である場合、静的に切削力は一一定であることと切削機構をモデル化しやすいため、その変動成分を処理することにより工具状態や加工状態を認識することが容易である。しかしながらフライス加工やエンドミル加工においては、その切削機構が複雑でモデル化が難しくなったこと、および切削力が基本的に変動するために特に実時間で処理することや、抽出した情報と切削機構の対応が難しく、それほど多くの報告はなされていないのが現状である。

その中でフライス加工やエンドミル加工について、加工状態の検知、予知に関する研究として、高田は音声認識の技術を利用して加工中の音をモニタすることでフライス加工において切れ刃の破損を認識する報告を行なっている [41]。さらに高田は [42] においては、フライス加工における工具の破損を変動切削力の平均値からの偏差を評価することで認識できることを報告している。

Altintas らは、フライス加工における切れ刃の破損検知の報告を行なっているが [43]、ここでは合成切削力の時間平均値を破損の前後において比較することによって検知できることを示している。

Tarn らは、フライス加工における工具と加工状態のオンラインモニタリングについて、工具1回転あたりの切削力からキーとなる特徴を抽出することを提案し、それを工具破損の監視に適用している [44]。

Thusty らも、フライス加工について切れ刃の破損を検知する報告をしている [45]。ここでは周期的に変動する切削力に対して、工具回転と同期してデータをサンプリングすることによって変動成分を除去し、そのあと一刃ごとに切削力の平均値を計算する。これを切れ刃について比較することによって特定の切れ刃の破損を検知するものである。

Smith, Thusty は、[46] において、エンドミル加工のびびり制御を報告しているが、びびり検知にはFFTにより行なっているが必要なデータが集まるまでに数秒かかる点が問題であると指摘している。

星らもフライス加工に関する振動抑制システムの開発について報告しているが [47]、ここでも振動検知にFFTを行ない処理に1秒程度かかることを指摘している。

Mannan らは、スピンドルの動力および電流によって工具の摩耗状態を監視することを試みている [48]。切削力が十分大きい場合には、動力や電流値と切削力との相関をとることが可能であり、摩耗状態を監視することができるが、小径のエンドミルや仕上げ加工などにおいては、この手法では難しいことを指摘している。

竹下らは、AE(Acoustic Emission) による加工状態の監視について報告を行なっている [49]。彼らはフライス加工におけるびびり振動や工具摩耗、さらに切れ刃の欠損の検知を行なうために、AE 信号を用いる方法を提案している。

このようにフライス加工における加工状態の監視については旋削加工ほど多くの研究が行なわれているとはいえないが、そのなかで多くの研究者は加工状態として切れ刃の破損を対象としている。一方びびり振動の検知については、実時間性に課題が残っている。また摩耗については、AE 信号を用いた検知が多く行なわれているが、AE 信号と摩耗との物理的関係が明らかにされるにはさらに研究が必要である。

フライス加工における最適制御や適応制御に関する研究については、切削力を一定に保つように送り速度を制御する ACC(Adaptive Control for Constraints) と加工効率をあげるために送り速度や主軸回転数を制御する ACO(Adaptive Control for Optimization) の2つに分けられる。

Lauderbaugh らは、フライス加工の力制御をモデルリファレンス適応制御器(MRAC, Model Reference Adaptive Control) により行う研究をしている [50]。この研究では、従来の研究において一定のゲインを用いた制御器が用いられていた点を指摘した上で、ノイズと計算時間に留意した MRAC の構成について述べている。その結果一定ゲインであるよりも満足いくパフォーマンスが得られることを示しているが、同時にモデル化されない動特性や摩耗によるノイズのために調整が難しいことを問題点としてあげている。

Yanushevsky らは、切削加工における切削力の最適制御について報告を行っている [51]。この報告では、バイト加工やフライス加工についての切削過程を記述する事によって、一般的なモデルを導き、制御器の統合問題を解決するために微分・差分システムを適用している。

Lin らは、正面フライス加工における振動制御に対する変速切削法の適用について報告している [52]。この報告では、サーボの制御能力とびびり振動の抑制効果の両方の立場から、どのように主軸回転数を制御するのがよいか検討を行なっている。

Smith らはフライスによる高速切削における最適スピンドルスピードの自動設定について研究している [53, 46]。スピンドルスピードや動力の増加と金属除去率

を上げることによって、安定限界線図に示されるような現象が起こる可能性が非常に大きくなっていくため、最適なスピンドルスピードを設定することが非常に重要な課題となる。多くのフライス加工において、切れ刃と主軸回転によって発生する振動数を、系の固有振動数に等しくなるように設定するとびり抑制効果があることを示している。このとき強制振動の共振は加工面の起伏により減衰されるため問題にはならない事も示している。

適応制御や最適制御は何を目的関数として設計するかで、さまざまな形の報告がなされているが、いずれにしても良好な加工状態を保つことが満たされるべき前提条件であり、これは加工状態を監視する技術と大きく関係のある問題である。

加工システムの知能化に関する研究では、知識表現、知識援用、知識獲得の3点をどのように実現するかが問題となる。対象とする現象が理論に基づいて表現できることが最も簡単であるが、現在のところ切削理論は完備されたものにはなっていない。熟練者のもつ定性的知識を加工に関するルールとして、それらをプロダクションルールやフレームシステム[54]によって表現する手法や知識化の困難な部分にファジーやニューラルネットワークによってシステムを構築することがよく行なわれる。

森らは、巨大化しつつある生産システムにおいて構成機械がシステム全体と協調しながら、個々の自律性を持って運転を継続できる機能をもつインテリジェント制御機械加工システムについて研究を行っている[55, 56, 57]。彼らは人間のもつ知識処理機能を制御系に取り入れることによって、不測のトラブルに加工機械自身が柔軟に対応しながら目標の加工に向けて自動運転が継続できる機能の実現を目指している。特に知識処理における実時間性を重視して研究を進めている。

松村らは超多種極少量生産形態を取り上げ、従来のデータベース検索型の作業設計システムの運用の難しさを指摘し、これに取って代わるシステムを提案している[58, 59, 60, 61, 62, 63]。すなわち、システムは工作機械上で運用され、工作機械の加工経験を自己学習しながら少ないデータの変更によって加工環境に適應できるもの、また新しい作業に対してはその切削状態を予測できるものを考えている。

米田らは、習熟型研削加工システムの開発を行なっている[64]。彼らは、多種少量生産に対して効率的な生産システムを実現するために、加工機械そのものが具備すべきシステムの特徴について考察した結果、習熟型自律機械システムを提案し、ニューラルネットワークを用いた研削加工システムにこれを適用している。ここではニューラルネットワークの学習機構により習熟するシステムを実現している。

浅井は実際にトヨタ自動車株式会社において稼働しているプレス金型高速高精度無人化生産システムの開発と実用化について報告している[65]。その中でも、

CAD/CAM 技術、NC 加工技術、搬送技術などの構成要素から、各要素技術の最適化、運転管理などの統合化技術までが具体的に述べられている。ここでは、実用化という点で、個々の技術はかなり高度な機能を持っているが、加工技術に限った場合、加工現象を物理的にアプローチするという方向ではあまり研究を行っていない。

1.3 本研究の目的と意義

本研究ではとくに加工機械を取り上げその知能化を考える。具体的には、加工における物理現象が発生する信号を力センサにより実時間で獲得し、この多軸力情報の多次元的変換によって新たに得られた情報により動作することによって加工条件を常に最適に保ち、得られた情報を知識として蓄積することの特徴とする知能化生産システムを構築する。すなわち、

1. 多軸力情報を加工部から設計部、加工条件決定部へ帰還させることを特徴とする、多軸力情報を用いた知能化生産システムの構成を提案すること、
2. 多軸力情報を多次元的に変換するために、加工の物理現象を明らかにすること、
3. 多軸力情報の多次元的変換法について提案し、知識獲得、加工機械の制御の手法を明らかにすること、
4. 多軸力情報に基づいて動作が決定されるような加工機械のシステム構成を明らかにすること、および
5. 提案したシステムを実際の機械加工に適用することにより有効性を確認すること

である。

加工機械が自律的に行動を行うためには、加工の前段階としての設計部からの情報を必要に応じて受け取る必要があるし、逆に加工機械側も加工機械の状態や獲得された情報を必要に応じて設計部へ帰還する事が、全体が最適化されるために重要である。

加工機械が行動を決定するためには自らの状態を知る必要があり、その手段としてセンサ機能を有することが不可欠である。センサ情報を適当に処理して状態を獲得するには、センサ情報の物理的意味が明らかであるとともに、状態情報に変換する処理手法が必要である。獲得したい情報に依るが多くの場合実時間に処理されることが重要となる。

獲得した状態は行動を決定(制御)するために利用されるが、それだけでは適応制御システムでしかなくなる。獲得した情報は経験として整理され、その後の行動に反映されるべきであり、それが加工機械の状態であるとして設計部に帰還されるべきである。一般にセンサによって獲得した情報は膨大であるので、如何にして整理するかが重要な課題となる。

今後の自動化あるいは無人化された生産システムにおいて、これまで人間が担ってきた役割を補うことは非常に重要である。特に加工の立場から考えると加工条件を常に最適に保つことができないと品質の良い製品ができないばかりか不良品すら生産されてしまう[66]。しかし、最適な加工条件を定量的に予測できることは少ない。なぜなら加工現象が非常に複雑であること、加工状態は加工中に時々刻々変化すること、制御因子に含まれない外乱が存在することなどの理由があるからである。人はこの複雑な現象を五感と勘と経験によってとらえて加工条件の最適化に努めてきた。

したがって自動化を単に自動で動く程度の自動化ではなく、時々刻々変化する物理現象をとらえて、現象に応じて柔軟に動作したり、そのことを経験や知識として蓄積し、その結果を情報として他に伝達することまでを考慮して生産システムの「部分」の在り方を提案した例は少なく、今後の情報化生産システムに与える意義は大きい。

1.4 本論文の概要

本論文は全9章から構成されている。

第2章では、従来の生産システムが作業の省力化を目的として自動化が押し進められ、また加工機械の剛性によって精度の追求を行ってきたことを指摘する。しかしながら加工工程における複雑な処理や判断は人が行なっていて、この部分の自動化のために人の得た知識や経験を計算機の中に組み込むことが試みられている。一方工程の自動化によって人に代わって知識を得る仕組みを持たないと、システムの進歩はありえない。知識や経験が加工によって生じる物理現象に基づいていることから、センサによって加工により発生する物理現象を定量的に捉えて、それを知識や経験として蓄積するシステムを構築するのが本質である。そこで、センサ情報に基づいた生産システムを提案し、基本構成を示す。

第3章以降ではセンサ情報のうち加工中に発生する切削力、すなわち多軸力情報について議論を展開する。

第3章では、本システムで使用する工作機械であるマシニング・センタにおいて非常によく用いられるエンドミル加工、加工工程の最終段階であるタップ加工を取り上げた物理モデルを構築する。多軸力情報から加工の物理現象をとらえることにより加工の高精度化、高効率化あるいは知識獲得を行なうためには、加工の物理現象を明らかにする必要がある。これにより物理現象が発生する情報のうちの情報に着目すれば良いか明らかになる。

第4章では、自動化あるいは無人化される生産システムにおいては、加工状態を監視し判定することは非常に重要であると同時に、加工機械が自律して動作を行ない、加工に関する知識を獲得するための重要な手段の一つであることを示す。加工状態の監視手法においては、(i) 実時間で処理できること、(ii) 実時間で判定できること、(iii) 知識として獲得可能な出力であることが必要な条件となる。このような観点から、エンドミルについて統計的処理などでは対処しにくいびり振動の検知について、実時間判定法を提案する。

加工に関する知識のうち、人が得たものでコンピュータが処理できる形の知識は積極的に利用することが有効である。本論文で提案するようなセンサ情報によって動作する生産システムでは、加工に関する知識は加工に関する物理モデルと多軸力情報によって構築されることが至極当然である。第5章では理論的にある程度許容された物理モデルや関係式に基づいて、膨大な多軸力情報を圧縮して蓄積する考え方を提案し、安定な加工状態を実現する加工条件の決定について取り上げ、その一例を示す。

第6章では、多軸力情報に基づく知能化生産システムを構成するために必要な

ハードウェアとして、マルチセンサ融合型加工機械の構成について述べる。加工の物理現象を獲得するために必要な力センサおよび工作機械の変形を知る変形センサ、不測の事態からハードウェアを保護するために必要なフェイルセーフ機構、獲得したセンサ情報を処理し加工状態を判断し、その結果にしたがって工作機械の動作を決定するための実時間制御器など、必要な機能を述べ実際に実現したハードウェアについて述べる。

第7章では、第6章までに示してきた物理モデルとそれに基づく実時間加工状態判定法、多軸力情報に基づいた加工に関する知識を用いて、マルチセンサ融合型加工機械が自律して加工を行なうための基本的な機能として、(i) 加工状態の自己診断機能、(ii) 加工条件の自己修正機能、(iii) 加工に関する知識の自己学習機能をあげ、これらを実現するためのソフトウェア構成と有効性を確認するための実験結果をしめす。

第8章では、本論文の総括と展望を行なう。

第9章は本論文の結論を述べ本研究のまとめとする。

第 2 章

センサ情報統合型 知能化生産システム の 概念 と 構成

本章では「多軸力情報を用いた知能化生産システム」の上位概念である「センサ情報統合型知能化生産システム」の設計思想、概念および基本構成について述べる。

センサ情報統合型知能化生産システムは、加工対象や加工環境をセンサで認識し、獲得したセンサ情報に基づき自己の動作を知的に決定することによって、単品を単期間に精度良く生産するシステムである。

センサ情報統合型知能化生産システムが有すべき基本要素は、

- 対象や環境を予測する物理モデル、
- 対象や環境を認識するためのセンサ、
- 膨大なセンサ情報から必要な情報を抽出するための情報処理手法、
- センサ情報に基づいて自己の行動を知的に決定するための制御アルゴリズム
- 目的の行動を実現するためのアクチュエータ
- マン・マシン・インタフェース

である。そして情報のフィードフォワードと情報のフィードバックが行なわれるように、これらの要素を構成することがセンサ情報統合型知能化生産システムを構築する上で重要となる。これらの基本要素をもつセンサ情報統合型知能化生産システムは

- センサ情報帰還型 CAD/CAM
- マルチセンサ融合型加工機械
- 実時間加工状態判定法
- 加工に関する知識
- デュアルモードユーザインタフェース

の5つの部分で構成することができる。

「多軸力情報を用いた知能化生産システム」は「センサ情報統合型知能化生産システム」の設計思想に基づいて、加工中に発生する加工力に着目して構築したものである。

2.1 従来の生産システムとその問題点

生産システムと言えば、機能設計や形状設計、工程設計、加工の他にも、部品検査、組立て、製品検査、搬送、保管といった工程もあるが、本論文では加工を中心として議論することにする。

NCあるいはCNCが発達する前は、人が加工力、加工音、切屑の状態、工具の状態、加工面の状態などを見て、勘と経験により加工条件を設定し修正して製品を作っていた。そのため必ずしも繰り返しの精度や効率は良くないが発生する現象に対して柔軟性に優れていた。人と加工機械を合わせたシステムを一つの機械システムであるとすれば、この機械システムは自己診断、自己修復、自己学習機能を有した自律機械システムといえる。

一方NC、CNCによる生産システムにおいてはプログラムによりあらかじめ設定された条件で加工が行なわれる。NCで制御される機械は繰り返し作業を非常に得意とするため、人が行なうよりはずっと精度や効率が向上した。しかし人が行なったように加工状態に応じて条件を修正したり、不測の事態に対応するという柔軟性に乏しい。これは開発されてきた生産システムが、作業の省力化を前提にしてきたシステムであったためである。そして下準備や加工条件の設定など判断や処理の複雑な部分については、技術的問題とコストの問題により採算性が悪いというため相変わらず人に頼っているのが現状である。それは複雑な判断と処理が必要になるからである。また大量生産システムのような繰り返し工程が多い場合、人にまかせても全体の効率やコストに対する影響は小さくそれほど問題にはならなかったことも理由の一つである。

しかし市場の多品種少量化、変種変量化、リードタイムの短縮、製造期間の短縮、製品の短寿命化の背景に対して、製品の製造期間において生産準備に要する時間が占める割合が相対的に大きくなってきた。そのため最も開発が遅れている生産準備や加工工程の自動化や知能化、情報化の要求が以前にも増して高まってきた。特に加工工程は生産システムの中で製品あるいは部品の精度や品質といった付加価値を与える工程であり、市場において製品が競争力を得るための重要な工程といえる。

加工工程設計の自動化について取り上げてみるとそこでは、加工順序の決定、工具経路の決定、加工条件の決定が主な作業となる。加工工程の自動化を目的として多くのシステムが開発されている。NCプログラミングシステムとして代表的なAPTやEXAPTがある[67]。APTはNC加工における工具経路の自動決定のために開発された。このシステムでは、加工機械が必要とする制御情報のうち経路情報のみが生成され、使用工具や工具の送り速度や主軸回転数など加工条件に関

する情報は、加工技術者が必要に応じて入力する形をとっている。一方加工順序や加工条件なども含めて自動化を目的として開発されたものがEXAPTである。加工順序や加工条件は加工法によって決定する事項や基準が異なるために、加工法によりいくつかのシステムが開発されている。EXAPTでの加工条件の決定は加工技術ファイル、工具ファイル、材料ファイルを順次参照することにより行なわれる。加工条件の決定は理論的裏付けのある式から計算されるが、さらに各種の条件による特殊性を考慮した修正係数を準備している。

こうした自動化システムの開発と加工に関する情報のデータベース化の結果、加工工程設計の部分について飛躍的に作業時間の短縮が実現された。しかしながら、こうしたシステムであってもまだ多くの問題を抱えている。その問題の一つは技術情報のデータベース化にあると言われている。実際の加工作業は多くの要因に多様な判断を加える作業であり、それは加工環境、たとえば加工機械や工具、工作物の材質やその形状、室温変化などにより発生する加工現象が多様に変化する動的な対象を扱っていることが理由となっている。そのため作業現場には即座に最適な判断ができる熟練した技術者が多く存在しているのが現状である。

加工機械の自動化について取り上げてみると、加工機械の多くはNC装置によって自動的に動作するようになっている。このように自動化が進んだときには、計測・監視技術がきわめて重要な課題の一つとなる[68]。システムを最適な状態に制御し、システムが正常な運転状態であるかどうかを見きわめ、異常があればそれを認識して必要な処理をとる。さらに、故障が発生すればそれを診断して適切な修復作業をする、という一連の動作を自動的に行なう必要がある。そのためには最も基本的な段階として、システムの状態を情報として獲得するためのセンサ技術が必要である。加工中の異常を検知するためにスピンドルモータの電流値を用いたり[48]、AEセンサによって工具状態を監視するシステムがすでに導入されている例もある[65]。またマイクロフォンによって音を収集して異常を認識する手法もある。また振動を計測するために加速度センサを取り付けられる例もある。これらのセンサや手法は現在あるシステムに取り付けが容易であったり、加工機械がもとより検出可能である信号(電流値や動力)を利用するだけで済むという簡便さが、実用化されている大きな理由である。一方これらのセンサや手法の問題点としては、実際の現象との対応が明確でないこと、ノイズの影響を大きく受けること、などがある。

加工機械のハードウェアの観点から考えると、機械加工の精度を上げるために加工機械の剛性が上がるような構造にしたり、送り機構の位置決め精度や繰り返し精度を上げることに多く力が注がれてきた。しかしながら、加工中に発生する

加工熱、主軸モータから発生する熱、加工機械を囲む雰囲気温度変化により加工機械は大きく変形する。また工作物側の剛性が低い薄物部品の加工などにおいては、加工力によって工作物が逃げたり、振動を起こすという問題がある。このような問題に対しては、加工機械の剛性や精度を上げるだけでは解決できない。

いくつかの観点から生産システムにおいて簡単に追ってみた。それぞれの立場からさまざまな課題が克服され大きく進歩してきたことが分かった。それと同時にまだ解決しなければならない問題も多い。それぞれのレベルにおいて解決されるべき問題もあるが、共通の認識に立って考えれば克服される問題がありそうである。この認識は、加工中に発生する物理現象を積極的に利用することである。発生する物理現象にしたがって加工機械が能動的に動作することによって、剛性や構成要素の精度だけでは実現できない精度を実現できる。また加工中に発生する異常状態は、加工によって発生する物理現象を監視することにはかならない。加工に関するデータベースにより加工情報を生成する加工工程設計部にとっては、データベースだけでは予測できない現象を加工機械が物理現象に応じた柔軟な加工動作によって補うとともに、その情報をデータベースにフィードバックすることにより、効率のよい工程計画を立てることが可能となる。機能設計や形状設計の段階においては、加工の物理現象に基づいたデータベースにより、例えば設計された形状を要求される機能を満たして加工することが難しいことを即座に提示することができる。これにより設計者はすぐに設計変更に取りかかることが可能となる。

2.2 センサ情報統合型知能化生産システムの設計思想

センサ情報統合型知能化生産システムは、加工対象や加工環境をセンサで認識し、獲得したセンサ情報に基づき自己の動作を知的に決定することによって、単品を迅速に精度良く生産するシステムである。

このような生産システムを実現するための基本要素は、

- 対象や環境を予測する物理モデル、
- 対象や環境を認識するためのセンサ、
- 膨大なセンサ情報から必要な情報を抽出するための情報処理手法、
- センサ情報に基づいて自己の行動を知的に決定するための制御アルゴリズム
- 目的の行動を実現するためのアクチュエータ
- マン・マシン・インタフェイス

となる。そして情報のフィードフォワードと情報のフィードバックが行なわれるように、これらの要素が構成されることがセンサ情報統合型知能化生産システムを構築する上で重要となる。

情報のフィードフォワードと情報のフィードバックは、通常的设计・加工のプロセスでは、常に行なわれている。それは設計変更や修正加工といった作業として目に見える形である場合と、人間の頭と体の中で思考、感覚に基づく情報が形成する目に見えない形である場合がある。

一般に設計・加工が行なわれる過程を記述すると図 2.1 のようになる。すなわち、

- [1] 機能設計、
- [2] 形状設計、
- [3] 加工法、加工順序の決定、
- [4] 加工現象の予測(加工の物理モデリング)、
- [5] 加工機械の動作予測(動作のモデリング)、
- [6] 加工機械の動作、
- [7] 加工現象、
- [8] 一連の加工(部品の製作)、

[9] 組み立て、検査

の手順でものが生産される。



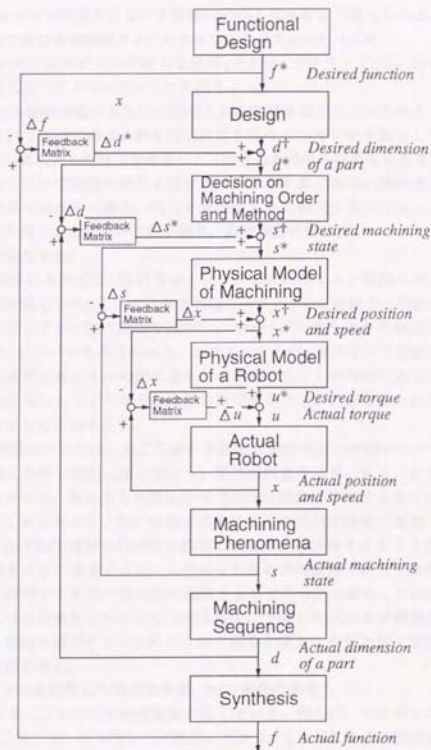


図 2.1 生産システムの機能ダイアグラム

この手順の中で実現されるべき機能は次のようになると考えられる。

(1) 各段階における情報のフィードフォワード、フィードバック

各段階におけるモデリングによる予測(フィードフォワード)と、目標値と実際の値との差に基づくフィードバックを行う。

加工された機械部品が果たして要求された機能を満たしているかということは常に検査される事柄である。例えば薄肉部を有する力センサを設計して加工を行った場合、要求通りの出力を得ることができるかは最も重要な検査項目の一つである。ここで実際の出力と要求出力の差が計算される。薄肉部を有する力センサの製作では多くの場合、出力と剛性が互いに相反するパラメータとなるため、剛性が仕様を満たすものでない場合、設計段階に情報がフィードバックされ、設計変更が発生する。

設計の段階においては、設計者がイメージしていたものと実際に加工された工作物との間に隔たりが生じることが常に起こっている。この場合、設計者は工作物に対してマニュアルで加工機械を操作し、イメージに合うように修正加工を行うといったフィードバックが行われる。このフィードバックによって設計者のイメージと実際に具現されたものの間の違いを小さくすることが可能となると同時に、実物を操作することにより新たな発想を展開するきっかけが与えられるという効果をも期待することができる。

加工の段階においては、加工現象を予測する物理モデルや種々のデータベースを用いて加工条件を決定し加工を行う。製品の精度や品質、あるいは加工の効率を上げるためには、あらかじめ発生するであろう現象を予測することは非常に重要である。しかしながら、加工の物理現象は多くの原因が複雑に影響しあって生じる。すなわち加工機械の特性や工作物の大きさ、形状などにより予測した加工状態が実現されない場合がある。したがって単に予測段階で決定した種々の条件をそのまま適用するだけでは目的を達成するには不十分である。この場合、実際に発生している現象をとらえることによって、予測した状態との偏差を求め、加工に関する知識を援用することにより加工条件を変更し良好な加工状態を実現することが重要である。

(2) 物理モデルを利用した現象の予測、加工条件の決定

加工を行うと、かならず物理現象が生じている。例えば、工作物と工具の間では、加工力、加工熱、加工音などが発生しており、また加工と直接関係ない部分でも、スピンドルモータが発生する熱や、一日における温度変化による加工機械の熱変形が起こっている。高精度な加工を実現するためには、単に加工機械の剛性を高めるだけでは不十分であり、こうした物理現象を解明しモデルを持つことに

よって、あらかじめ現象を予測し補正する機能が重要である。

また、加工条件を決定するには、加工精度、加工効率、加工コストなどが考慮されるべきでかつ定量的に評価する必要がある。その中で、加工精度や加工効率は物理モデルで計算される種々の加工に関する量によって計算できる。さらに加工条件を修正する場合に、定量的に正確に表現できなくても定性的にどの制御パラメータをどのように制御すればどのような結果が期待されるのか、という程度でも記述されていることは重要である。

これらの事柄はこれまでの生産システムにおいては、加工条件などを決定する熟練技術者が経験と勘に基づいて予測を行ない、加工中の状況あるいは加工結果と予測の違いを修正するということが常に行なわれている。

(3) センサ情報に基づく自己判定機能、自己修正機能、自己学習機能とその結果に基づくデータベースの構築

人間が加工を行う場合、大変重要な点は五感をフルに活用して積極的に情報を収集していることである。例えば、自動車の金型における研削では、目を用いた視覚情報と、指先に感じられる反力によって形状を認識しつつ、反力に応じて加える力を巧みに変えて目的の精度、粗さを達成している。この過程において、人間は種々の情報を融合したり変換することによって、経験的な判断、知識として熟練者の頭の中に蓄積する。

このうち、数式や言葉などなんらかの方法で表現可能なものはデータベースとして構築でき、人工知能的なアプローチによって利用することができる。一方感覚的な判断などはなかなか表現が難しい。その場合、人間のもつ五感に相当する機能をもつセンサを加工機械に取り付け、そこから得られる情報をできる限り圧縮し、かつ援用しやすい状態で蓄積することが重要である。

加工機械がセンサ情報より自らの状態を判断するには、判断する現象について十分な実時間性をもった処理手法が不可欠である。また単に判断するだけでは不十分で、判定結果が加工現象の意味を明確にもつ物理量であることは重要である。それは加工機械が自らの加工動作を修正する場合に、目標関数の中に状態量として判定結果を組み込むことによって制御量を決定する必要があるからである。

加工機械が加工中に自らの状態を最適にするための修正過程において、各制御パラメータとその時の状態量を記憶しておき、それらを何らかのモデルや規則に基づいて整理することにより学習機能を持たせることができる。また物理モデルには、実際の現象を獲得しなければ決定されない未知変数がある。これらを決定するための動作を行ないセンサから情報を得ることで変数の学習を行なうことができる。

加工機械がもつ、センサ情報に基づく機能によって得られた結果は、センサ情報に基づいたデータベースとして蓄積される。

(4) デュアルモード・ユーザインタフェイス

研究で用いる装置の試作時、あるいは、製品の開発時には、試行錯誤は避けられない。したがって設計終了後すべてを自動的に加工したあと、どうしても途中で手直しする必要に迫られることが多い。そこで、(i) デザインニング部で設計したものをすべて自動的に加工するモードと、(ii) 対話的に加工機械を操作できるユーザインタフェイスを用いて、一部を手動で操作するモードを持つことは重要である(「デュアルモード・オペレーション」)。これらのモードを自由に組み合わせ運用できるような機能を設けることによって、設計者はアイデアの具体的な出力に対して即座に修正を加えることが可能である。マニュアルで操作する場合、加工機械はそれ自身がもつ加工に関する知識、機能を用いて、操作者である設計者を加工の立場から支援する。これにより操作者は加工に関する知識が乏しくても容易に加工操作を行なうことが可能となる。

このモードを実現するにあたって、設計者は設計の環境、例えばデザインング・ルームから加工のマニュアル・オペレーションを実行できることが望ましい。すなわち、ここに「加工のテレ・オペレーション」の概念を導入する。この概念は単にデュアルモードの実現のためのものではなく、もっと一般的に意味をもつ概念である。すなわち、加工機械が存在する空間は、騒音、臭い、危険などの問題が常にある人間にとって快適な空間であるとは言いがたい。実際に、最近ではこうした問題から加工にたずさわる人々が減少している。また、ナノ・ロボットによるナノ・オーダーの加工や、宇宙空間の加工、さらにマイクロ・サージェリなどでは、まさにこの概念に基づいた技術が大変有効である。この機能を実現するための基本的技術はネットワーク技術である。

まとめると、

1. 加工機械が加工現象をとらえるためのセンサを有すること、
2. センサ情報をもとにフィードバック・ループを形成し自律的に加工を行なうこと、
3. センサ情報により加工状態を実時間で認識できること、
4. 加工に関する物理モデルを保有し、種々のパラメータをセンサ情報により自動的に決定、更新できること、

5. 定性的な知識に加え、センサ情報と加工に関する物理モデルによって裏付けられた定量的な知識を保有していること、
6. 設計者は加工機械を直接操作するインタフェイスと、加工の立場から知能化された加工機械に支援されることにより、容易に実物を操作・加工できること

が基本的機能として要求される。

図 2.1 において情報のながれを見ると、まず機能設計から加工を通して組立て、検査までを一直線で結ばれるものがある。もう一つの情報のながれは、物理現象を核としてそれを取り巻くようにフィードバックループが形成されているものである。2.1でも考察したように、物理現象を核とした複数の層をなすフィードバックループをも考慮してシステムを構築することが本論文で提案する基本的思想である。

2.3 センサ情報統合型知能化生産システムの基本構成

前節で述べた基本要素を情報のフィードフォワードとフィードバックが行なわれるように構成すると、センサ情報統合型知能化生産システムは大きくわけて次の5つの部分から構成される(図2.2)。

1. マルチセンサ融合型加工機械
2. 実時間加工状態判定
3. 加工に関する知識
4. センサ情報帰還型CAD/CAM
5. デュアルモード・ユーザインタフェイス

ユーザは製作したい機械部品等を、センサ情報帰還型CAD/CAM上で記述する。形状の記述にあたっては加工形状として定義された3次元形状を入力して行う。ユーザにとっては、形状を線の集合として記述していく単純作業から解放され、発想をコンピュータ上に速やかに形状として入力でき、独創的な仕事に時間を費やせることを基本概念として持っている。システムにとっては、機械部品あるいは加工として意味のある(フィーチャー・ベーストな)単位で形状が入力されているために、それら形状データベースとセンサ情報に基づいた加工に関するデータ・ベースとの結合が非常に容易になる。すなわち加工に関する知識のもつ加工に関するデータベースを共有することによって、加工条件や工具経路を決定することが可能となる。

こうして決定された工具経路および加工条件は、加工機械の動作を外部制御する実時間制御器が解釈するコードに変換して送られる。マルチセンサ融合型加工機械では、実時間制御器から送られる動作命令にしたがって加工を行う。短期間に精度良く生産を行なうために、加工中は発生する物理現象を的確にとらえるためのセンサの搭載が不可欠となる。発生する物理現象は複数存在しており、対象が多次元空間であるため、一般に搭載すべきセンサは、複数となる。

センサからの情報は実時間で実時間制御器に送られる。実時間制御器では、これらセンサからの情報を実時間加工状態判定法により処理し、常に加工状態を監視している。加工状態判定の結果は加工機械の動作を決定するための重要な情報であるため、実時間性を有することが基本的でかつ重要なこととなる。

加工状態が正常である場合には、加工効率を上げるために加工の規則にしたがって加工条件を常に修正しながら最適な条件を学習していく。加工状態に異常が発

生しそうな場合(予知)、あるいは実際に異常が発生した場合(検知)は、データベースに蓄積した加工に関する規則にしたがって、異常の回避のための加工条件の変更(フィードバック制御)を行なう。

しかしながら予測しえない事態が発生した場合は、ハードウェアとして実現されるフェイルセーフ機構により、加工システムを安全側へ退避させて過負荷を吸収するとともに、停止のための信号、命令を加工機械に送る。

加工中のセンサからの情報、加工条件の修正過程、加工後の製品、工具の状態などは、加工に関する知識に帰還される。これらの情報をもとに、データベースを更新したり、加工に関する規則を追加したり、あるいは物理モデルに対する変更を行う。

センサ情報を中心に得られた種々の情報が加工に関する知識に帰還されるため、これを共有しているCAD/CAMに対してもセンサ情報が帰還されることになる。したがって加工条件を決定したり工具経路を決定する時に加工機械の経験が生かされる。また設計段階においてもこれらの情報を利用することによって、設計対象の機能の実現と加工可能性とを考慮する機能を付加することによって、設計者を加工の立場からも支援することが可能となる。

実際に加工された対象と設計者が描いていたイメージと異なることがある。あるいは実物を見て別の発想が生まれることがある。このような場合に加工された対象に若干の加工を加えることにより、作りたいものが得られるのであれば設計者自身が自らの手で加工を行ない速やかにその結果を見たいということが起こる。この場合に設計者が存在する場所(通常は加工機械とは離れている)からマニュアルで操作・加工を行なえる環境が与えられる(テレ・オペレーション)。加工中は自動モードの時と全く同じ機能を加工機械が実現することによって、加工に関しては知識の少ない設計者を支援することができる。

このようにして設計者は、精度および品質を効率良く実現できる環境で容易にもの作りを行なうことができる。

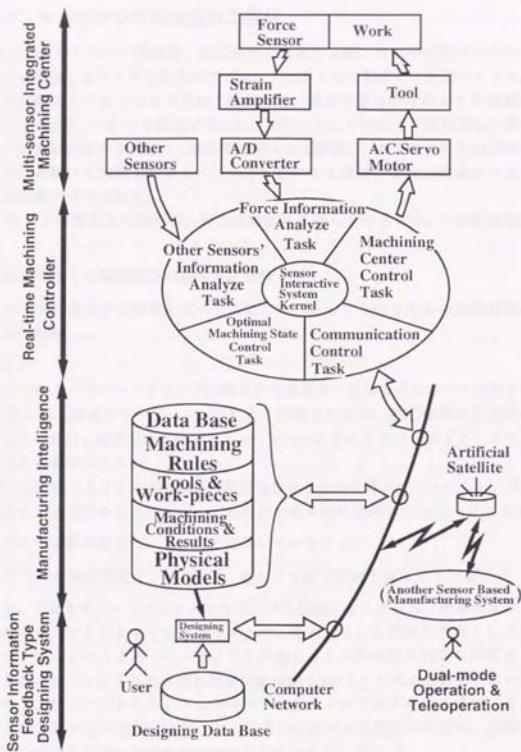


図 2.2 センサ情報統合型知能化生産システム構成

2.3.1 マルチセンサ融合型加工機械

加工の分野において高精度、高信頼性を実現する際、ただ単に剛性のみによってそれを実現しようとする従来のアプローチは不十分であることを述べてきた。また、力制御のようにこれまでの加工機械では、実現できなかったような機能も必要とされる[69]。これらを実現するには、加工によって生じる「物理現象の解明」と、そこから発生する情報の「実時間処理による獲得」、およびそれらの情報ならびに加工に関する知識を統合して「巧みに動作する機能」を加工機械にもたせることが必要不可欠である。

このような考え方を畑村は、加工の知能化と呼んでいる[70]。この概念の基本は、

- 加工で生じる物理現象の基本的な理解と
- そこから発生する情報を用いて所望のものをつくり出すための情報処理の基本的理解

である。

ここではその中でハードウェアの観点から必要かつ重要な点について説明する。

通常の加工機械はオープンループにより制御されるが、加工機械が自律的に動作するためには、加工現象を動作にフィードバックさせるクローズドループにより制御される必要がある。

加工中に生じるさまざまな物理現象を認識するために種々の「センシング機能」を付加する必要があるわけだが、その場合に基本的に理解しておくべきことは

- (a) すべての構成要素は、力と熱で変形していること、
- (b) すべての構成要素は、歪、温度、音という形で情報を発生していること

である。すなわちハードウェアとしてセンサを搭載するときには、物理現象として何が起こっているのかを十分に知った上で、発生している現象を情報として忠実にとらえることのできるハードウェアを用意し、その発生源に的確に搭載する必要がある。加工で生じる基本的な物理現象は図2.3のように考えられる。ものを加工すると、加工の行なわれている部分で加工反力と加工熱が発生するが、そのほかにも動力源からの発熱、伝熱と加工反力の伝達による構造物の変形、周囲への熱や音の発散など種々の現象が同時に生じている[71, 72]。

また、「巧みに動作する機能」を実現する上での指針としては、

- (c) すべての構造物は、情報の発生源であるとともに、アクチュエータにもなり、
- また、すべてのセンサは、アクチュエータに置換せられること、

- (d) 実時間で情報を処理する制御器を介したフィードバック・ループを形成すること

である。

具体的にそのハードウェア構成を図2.4に、信号および情報の伝達を図2.5に示す。加工機械に力センサや変形センサなどの各種センサを取り付け、これらからの情報を制御器に取り込んで処理し、実時間で加工機械にフィードバックする。

工作物は、テーブル型の力センサである6分力テーブルに取り付けられている。6分力テーブルは工作物側に作用する加工反力を検出するものである。一方工具は、工具ホルダー型の力センサであるFM式トルク・スラストセンサに取り付けられる。これは工具側に作用する加工反力を検出するものである。工作物側と工具側の両方に力センサを装備する理由として、

1. 工具によっては検出する力のオーダが異なることがあること、
2. 工具側と工作物側では振動モードや振動数が異なることがあり、現象を解明する上で両者を分けて考えた方が良い場合があること、

が上げられる。

また工作物側と工具側にはそれぞれフェイルセーフ機構を搭載する[73, 74]。フェイルセーフ機構は不測の事態が発生した時に、システムを安全側に退避し過負荷を吸収することによって、システムの破壊を防ぐものである。力センサを搭載する場合には特に重要な概念でセンサを保護する役割が大きいが、力センサのみならず加工システムを破壊から守り、自動的に復帰するという機能を持たせる概念は重要である。

加工熱やモータの発熱、あるいは外気温の変動により、工作機械の構造体のうち大きく変形する部分が存在する。ここでの変形は最終的には工具・工作物の相対変位を生じるため、加工物の精度に大きく影響する。しかしながら工具・工作物の相対変位を直接測定することは、切削や切削油などの外乱があり非常に難しい。そこで変形部の変形を測定するための変形センサを取り付ける。また熱で変形する部分を熱によって加熱あるいは冷却することにより、変形を打ち消すための熱アクチュエータをも取り付ける。

これら力センサおよび変形センサからの出力は増幅器により増幅された後、A/D変換をして実時間制御器に取り込まれる。実時間制御器においては、種々のセンサからの情報を実時間で処理することにより加工状態を認識し、その結果と加工に関する規則を適用することによって、加工機械の動作を決定する。決定された動作命令は、パラレルI/Oあるいはパルス・ジェネレータを介して加工機械

のもつNC装置に送られ、実際に動作する。このとき加工機械側では、外部のコンピュータからの制御情報を取り込んだり、加工機械側の状態を送出するためのI/Oポートを有することが重要である。これによりフィードバック・ループを形成することが可能となる。

また実時間制御器はローカルエリアネットワークにも接続されていて、加工機械で生じている種々の情報を離れたところに伝えることができ、逆に離れたところにあるデータベースサーバから、必要に応じて加工に関する知識を受けとることが可能となる。また従来からある加工機械の操作系とは全く異なり、操作しやすいインタフェースを用いて加工機械の動作を制御することも可能となる。

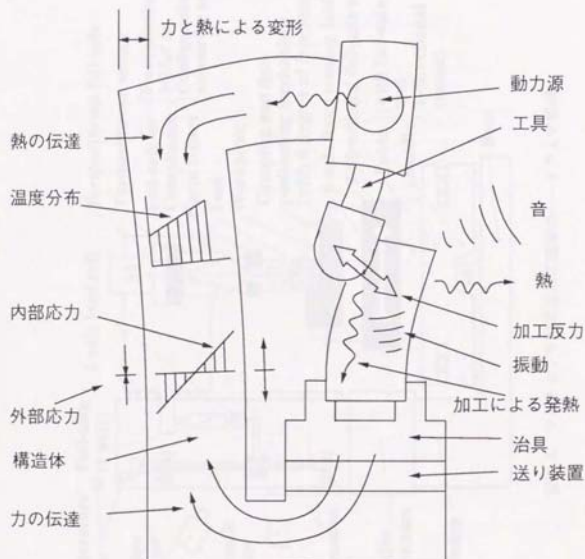


図 2.3 加工で生じる基本的物理現象 [70]

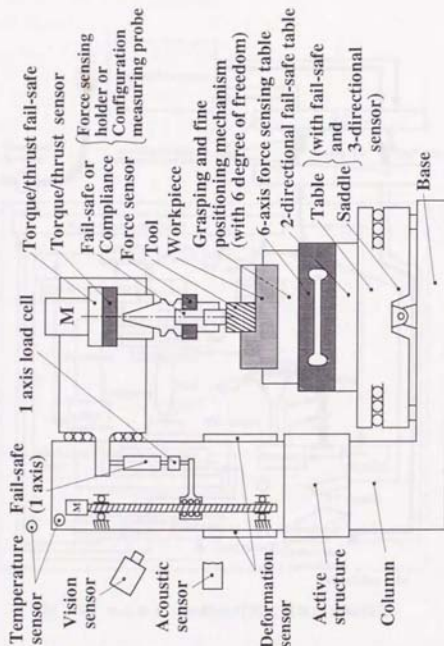


図 2.4 マルチセンサ融合型加工機械のハードウェア構成

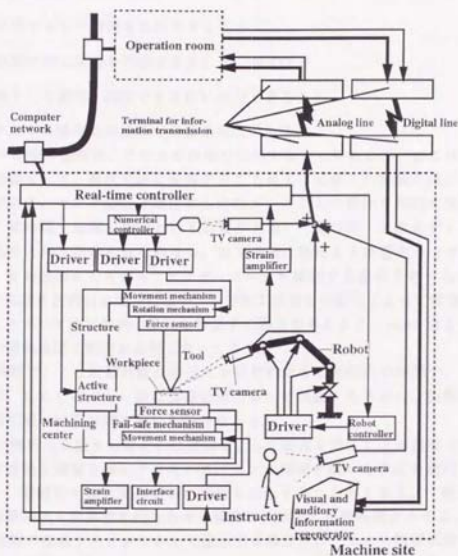


図 2.5 マルチセンサ融合型加工機械の情報伝達

2.3.2 実時間加工状態判定

生産システムが知的に動作するには、単に作業が自動的に行なわれるだけでは不十分であり、システム自身の状態を常に監視し、その結果にしたがってシステムが最適な状態に制御される必要がある。

そのためには、

- 実時間でセンサ情報を処理できること、
- 実時間で加工状態を判定できること、および
- 知識として獲得、蓄積できる形に出力できること

を満たすような情報処理技術が必要不可欠である。

センサからの情報は、そのままの形で利用することもあるが一般にはさまざまな信号処理をして、多次元的に変換することによって多くの情報を抽出することが可能である。センサ情報を獲得する目的がシステムの動作を知的に決定することから、実時間で処理が行なわれる必要がある。「実時間」とは必ずしも高速で行なわれるという意味にはならない。加工機械の熱による影響をセンサによって監視し、その結果にしたがってアクチュエータを駆動する場合を考えると、msecオーダーの処理や制御は必要ではない。一方加工状態を切削力によって監視し、その結果にしたがって加工機械の動作を修正する場合を考えると、msecあるいは μ msecオーダーの情報処理と制御が必要となってくる。

「実時間で」とは制御対象の変化に十分対応できる範囲内の時間で、ということになる。しかしながら一般に情報処理において問題となるのは、制御対象の変化が非常に短い時間の間に起こる場合である。

現象の解析の立場から考えれば変換によって情報を得ることが重要である。したがって有効な情報を抽出するために、センサ情報を種々の手法を適用して変換を行ない、最終的には人間が情報の特徴を抽出することさえある。一般に人間が行なう特徴抽出を計算機に行なわせる場合は、非常に処理時間がかかる。

一方実際の生産システムにおいて適用する場合には、センサ情報処理の目的はシステムの状態を認識しその結果にしたがってシステムの動作を決定することにある。センサ情報からの特徴抽出は計算機によって行なわれなければならない。すなわちセンサ情報の変換結果が計算機にとって容易に特徴抽出できる形になっていること、すなわち実時間で加工状態を判定できる必要がある。

さらに本論文の基本的概念から、処理によって出力された情報が知識あるいはデータ・ベースとして獲得、蓄積でき、また利用されなければならない。

2.3.3 加工に関する知識

生産プロセスの全体の中でも特に重要な部分は製品に付加価値を与える加工工程で、この過程が製品の品質と価値を決定する。その工程に人が関与していた従来の生産システムでは、熟練者の技能が製品の品質と価値を決定するため、熟練者には高度の技能が要求されたが、それは長年の間に多くの加工現象を経験し勘を養っていく間に獲得されたものである。

これからの生産システムにおいては、この部分の自動化あるいは知能化が非常に重要な役割を担う。加工機械が自ら判断し動作を決定し学習を行ない知識を増やしていくためには、加工に関する知識を計算機の中に構築して利用する必要がある。加工に関する知識の構成は

- 加工の規則に関するデータ
- 工具と工作物に関するデータ
- 加工条件と加工結果に関するデータ
- 物理モデルに関するデータ

となる。人がこれまでに得てきた知識が表現可能であればこれを最大限に利用することができる。すなわちエキスパートシステムの手法を適用することによって構築することができる。しかしながら、人の知識は曖昧であったり、人によって異なることが多い。特に定量的な情報は加工現象が非常に複雑であるために、人によって異なることが多い。そこでこうした従来のアプローチに加え、センサ情報に基づいて加工の知識の構築することを提案する。本システムのセンサ情報統合型知能化生産システムの考えると、この考え方は本質的である。

これにより加工機械が、加工の関する知識を自己学習し、最適加工状態を実現することができる。このシーケンスは、切削加工においては例えば次のようである。

1. まず最初に、予め設定された加工条件に従ってワークを少しだけ切削する。
2. 得られたセンサ情報を実時間で処理し、加工状態を判断する。この結果から加工条件が適当であるかを判断する。
3. 加工状態が適当でない場合には、加工の規則、加工の物理モデルを用いて加工条件を修正する。

このシーケンスを繰り返し、加工条件を自己学習する。このような機能を支援するソフトウェアは、次の4つの部分から成る(図2.6)。

- (1) データ・ベース
- (2) センサ情報解析機構(実時間加工状態判定法)
- (3) 学習機構
- (4) ユーザ・インターフェイス

(1)のデータベースは、熟練技術者がもつ知識、経験に相当する部分、および工具や工作物の在庫管理データベースになっている。その内容は次の4つの部分から構成される。

- (a) 加工の規則のデータ
- (b) 工具および工作物に関するデータ
- (c) 加工条件および加工結果のデータ
- (d) 物理モデルのデータ

加工の規則に関するデータは、(i)加工条件を修正してより良い加工状態を実現するための規則、(ii)加工中に生じたトラブルに対していかに対処すれば良いかというトラブルシューティングに関する規則、に分けられる。工具に関するデータは、(i)工具在庫データベース、(ii)工具カタログデータベースの2つの役割を担う。工具によって適用される加工条件がある範囲で推奨されていて、加工条件を決定する際にこれらのデータが参照される。加工条件および加工結果のデータは、加工機械が適用した加工条件に対して加工状態や加工後の工作物の状態がいかなるものであったかという結果を持つものである。センサ情報を処理した結果はここに蓄積されて、その後加工動作を決定する場合に参照される。このデータベースを持つことによって学習機能を実現することが可能となる。物理モデルのデータは、切削力を予測するための切削機構に関する物理モデルのパラメータの値や、加工機械の変形から工具先端の変位を予測するための関係マトリクスの値などを持つ。

(2)のセンサ情報解析機構は、熟練技術者がもつ判断の機能に相当する部分である。具体的には、この部分は実時間制御器の上にあつて、加工機械からの情報を実時間で収集し、それを処理することによって、加工状態を常に監視している。

(3)は、熟練技術者がもつ経験、学習の機能に相当する部分である。この部分は、ネットワーク上に構築されていて、実時間制御器から加工状態が送られると、その情報とデータベースに基づいて推論を行い、データベースの構築、書換えを行っていく。

(4)は、このシステムとユーザを結ぶ部分である。

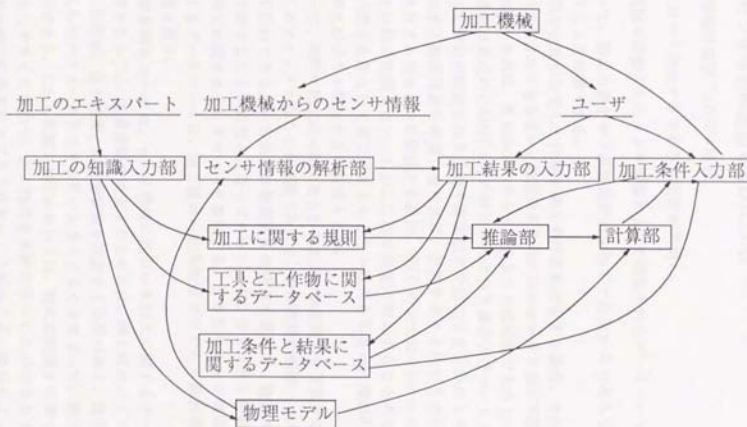


図 2.6 加工に関する知識のソフトウェア構成

2.3.4 センサ情報帰還型 CAD/CAM

センサ情報帰還型 CAD/CAM は、

- (i) 加工において発生するであろう現象を予測し、
- (ii) 加工機械に搭載されたセンサ情報によって構築されたデータベースを利用することによって、製品の設計や工具経路計画を加工で発生するであろう現象を考慮して行なうことを特徴とする。

機械部品の仕様が決定して仕様を満たす形状を決定する場合、その形状は加工できるものでなければならない。物理的に工具が届かないなど加工不能な場合はある程度の知識があれば、あらかじめチェックすることは可能であるし、干渉チェックなどの機能は最近の CAD/CAM に付加されている場合が多い。しかし CAD 上で決定された形状が指定された公差や表面粗さで加工できるかどうかは、加工において発生する物理現象を考慮しなければ、予測することはできない。例えば薄肉円筒部を有する力センサを設計する場合、CAD の上では 0.17mm の薄肉円筒部を作ることは何の問題もない。しかしこれを旋盤で加工することになった場合、これだけの厚さを果たして加工できるかどうかはわからない。薄肉円筒部においては加工中にびびりが発生する可能性もある。

したがって、実際に加工が可能であるかを加工の物理現象を予測することによってあらかじめチェックすることが可能であれば、製作期間の短縮、コストの軽減などの効果を期待できる。一方加工の物理現象は非常に複雑で、物理モデルによって完全に予測することが可能とはなっていない。そこでセンサを搭載した加工機械が持つ加工に関するデータベースを参照する。すなわちセンサ情報に基づいた加工に関するデータベースは、加工機械の動作決定だけでなく設計段階においても利用可能となる。

工具経路計画においては、センサ情報に基づいた加工に関するデータベースが非常に重要となる [76]。工具経路を決定するためには、例えばエンドミル加工では切削深さ、切削幅、送り速度、主軸回転数を決定する必要がある。幾何学的な計算では、これらのパラメータをできるだけ大きくとることによって、加工時間を短くすることができる。しかし実際の加工においては、特に切削深さが深くなるほどびびりが発生しやすくなるので、加工精度を良好に保つことができなくなったり、送り速度や主軸回転数を落さざるを得ないことが生じる。場合によっては、加工できない場合が発生する。

このような現象も理論的に予測することは非常に難しい。しかし実際の加工から得られたセンサ情報に基づく加工状態を保有するデータベースを参照すること

で、短期間で精度の良い加工を実現することが可能となる。

第3章

加工の物理現象の解析

3.1 加工の物理現象の重要性

加工技術は、(1) 精度のよい加工、(2) 効率のよい加工、(3) コストの低い加工をめざして発展してきた。さらに最近では、コンピュータおよびセンサ技術の発達とともに、(4) 加工の無人化、(5) 加工の適応制御も盛んに行われてきている。

加工で生じる物理現象を考えれば、これは工作物と工具の相互作用である。刃物による切削加工や研削加工の場合、刃物と工作物に運動を与える工作機械によって強制的に所定の切り込みが与えられる。これに対して砥粒加工の場合、工具に所定の圧力を加えることによって切り込みが与えられる[75]。どちらの場合も2つのものが接触しその結果として必ず「力」が生じるのである。そして力の発生の仕方によって工作物の加工精度が決定する。すなわち従来の剛性によって精度を上げようとするやり方は、発生する力による工具、工作物、工作機械など力の伝達経路に含まれるすべての構成要素の変形をできるだけ小さくしようとするものであった。従来のそのようなアプローチは、発生する力あるいはその結果発生する変形は避け得ぬものとして受動的に受け止め、その変形ができるだけ小さくなるように構造の剛性を上げるやり方であった。

最近のように要求される機能や精度が厳しくなっているため、剛性だけでは対処しきれないことがすでに起こっている。加工機械は力だけでなく熱(加工熱、モータの発熱、環境温度の変化)によって大きく変化することが分かっている。また製造される機械の高機能化、高性能化の要求が高まるにつれ、機械の構成部品の軽量化、薄物化が起こっている。これは加工する対象の剛性が落ちてくるため、あらかじめ決められた位置情報だけの制御では所望の精度を得ることはできない。

このような状況にあって、単に剛性をあげることで高い精度を実現することや、あらかじめ決められた動作を同じように繰り返し行なうような単なる自動化、従来からある技術を単に組み合わせただけのやり方では、種々の問題を解決することは難しい。加工システムを無人化、知能化を実現するためには、少なくともセンシング機能を加工システムにもたせる必要がある。

すでに述べたように、加工で生じる物理現象の基本的な理解と、そこから発生する情報を用いて所望のものを作るための情報処理の基本的理解をもってさまざまな問題を解決する考え方が、非常に重要かつ本質的である。

センシング機能を持たせるために種々のセンサをシステムに取り付けるわけだが、そのさいに対象とする物理現象を正しくセンシングするには、その物理現象がどのような仕組みで発生するのかを正しく理解している必要がある。それは加工力について考えれば、それは加工法によってさまざまである。

旋削加工では一般に、(i) 主分力、(ii) 送り分力、(iii) 背分力に分けて加工力が

評価される。旋削加工は連続切削であり理想的な加工では切削力は一定の状態である。そこで得られる多軸力情報の動的成分を監視することによって、摩耗状態や振動状態を検出することが可能となる。また、加工条件を決定するときの一つの尺度として加工機械の動力があげられるが、これは主として主分力によって計算することができる。

フライス加工やエンドミル加工においては、工具の回転運動によって加工が行われるため、合成切削抵抗の向きは時々刻々変化する。さらに、断続切削であり切りくずの厚みが変わるので、これにしたがって切削抵抗も変化するようになる。また複数の切れ刃を持つ場合には、同時に切削に関与する切れ刃が複数となることがある。そのため旋削加工のように単純にセンサ情報の動的成分を監視するだけでは、摩耗状態や振動状態を検出して加工状態を評価することはできない。

ドリルによる穴あけ加工の場合には、ドリルにかかる加工力は、(a) 主切れ刃に作用する力、(b) チゼル部に作用する力、(c) ドリル外周での摩擦力、(d) 溝における切りくず排出に伴う力に分けられ、これらは一般にトルクと送り方向のスラストに分けることができる。タップ加工の場合も同様にトルクとスラストに分けることができる。工具の折損や振動状態を予知するとき、ドリル加工の場合はトルクおよびスラストを総合的に監視することが有効であるが、タップの場合スラスト方向には、主軸回転と送りの同期を補正するためのバネ機構が通常装備されているので、トルクのみに着目しなければならない。

このように、加工方法によって切削抵抗もその挙動もさまざまである。このため、得られたセンサ情報に対して単に一般的データ処理手法を用いるのでは効果的な結果を得ることは難しい。人間が発生した物理現象から適切に情報を抽出して知識として獲得していくように、センサ情報から目的に即した情報を抽出するためには、加工現象を明らかにして物理モデルとして記述することが重要である。

3.2 エンドミル加工の物理モデル

3.2.1 従来の研究

フライス加工やエンドミル加工の正確なモデルの解析は、(i) 製品の品質の予測、(ii) 加工効率の予測、(iii) 加工状態の認識、(iv) 適応制御を行なう上で必要である。例えばそのようなモデルがあれば、試し切削においてNCプログラムの検証に必要な時間を大きく減らしたり、場合によってはなくすることが可能である。また適応制御の戦略を立てる上で信頼性をあげることが可能である。多くの異なるモデルが多くの研究者によって開発され、使用されてきた。

最も簡単なモデルでは、金属除去率と切削において消費される平均動力との関係に基づいたものがある。これはまず切削動力を $P = P_p(MRR)$ とおき、金属除去率 MRR を $MRR = b \cdot a \cdot m \cdot n$ (b : 主軸方向の切削深さ, a : 半径方向の切削深さ, m : 工具の切れ刃の数, c : 一刃あたりの送り量, n : 主軸回転速度) とおく。このモデルは非常に簡便で、スピンドルの選定や加工効率の評価において十分なモデルといえる。

一方時々刻々変化する切削力を表現するモデルも提案されている。考え方としてはねじれ刃を細かく分割し、その微小切れ刃に作用する瞬間切削力を計算し、そのベクトル和を計算して全体の切削力を考えるものである。フライス加工やエンドミル加工における切削力の計算については、現在この考え方が多く用いられている。切れ刃に作用する切削力は、切屑の断面積に比例すると仮定している。そしてモデルの適用目的に応じて、(a) 切削力による工具の変形および加工面の誤差を考慮するもの [76]、(b) 工具の変形による切削力の変化を再び工具変形にフィードバックするモデル [77, 78, 79]、(c) 直前の切れ刃が切削した加工面の影響を考慮したもの [80]、などがある [81]。

これらはいずれも、微小切れ刃に作用する瞬間切削力を計算するというモデルの拡張であると考えられる。多くのモデルでは比切削抵抗を一定と仮定して計算を行なっているが、比切削抵抗は切屑面積に対して寸法効果の影響を受けることが Kronenberg の式や ASME の式に表現されている。

次節での解析では比切削抵抗に Kronenberg の考え方を適用する。本論文で提案したモデルは、岩部らの報告 [82] に非常に似ている。しかし彼らの報告では、合成切削力が微小切れ刃に作用する微小合成切削力の積分で計算されるとしているが、実際には切削力のベクトルは切れ刃に沿って異なるため正しくない。次節の解析ではその点で異なった解析結果となっている。

3.2.2 切削抵抗の基礎式

図3.1は、右回転・下向き削りにおける工作物の切削状態を示している。図において座標系を、工具の送り方向をY軸正方向、鉛直上方をZ軸正方向とし、左手座標系とする。

工具の半径を r 、ねじれ角を γ (右ねじれ角)、すくい角を α とする。一刃あたりの送り量を S_z 、半径方向の切込み量(これを切削幅と呼ぶことにする)を R_d 、工具の軸方向の切込み量(これを切削深さと呼ぶことにする)を A_d とする。主軸回転数を $N(\text{rpm})$ 、送り速度を $V(\text{mm/min})$ 、切れ刃の枚数を n とすれば、一刃あたりの送り量 S_z は、

$$S_z = \frac{V}{N \times n} \quad (3.1)$$

時刻 t における全切削抵抗を $Q(t)$ 、各軸方向の切削抵抗をそれぞれ $Q_x(t)$ 、 $Q_y(t)$ 、 $Q_z(t)$ と置く。これらの間には

$$Q(t) = \sqrt{Q_x^2(t) + Q_y^2(t) + Q_z^2(t)} \quad (3.2)$$

の関係がある。エンドミルが n 枚の切れ刃を持ち、その i 番目の切れ刃に作用する各軸方向の切削抵抗をそれぞれ $Q_{ix}(t)$ 、 $Q_{iy}(t)$ 、 $Q_{iz}(t)$ と表すと

$$Q_x(t) = \sum_{i=1}^n Q_{ix}(t) \quad (3.3)$$

$$Q_y(t) = \sum_{i=1}^n Q_{iy}(t) \quad (3.4)$$

$$Q_z(t) = \sum_{i=1}^n Q_{iz}(t) \quad (3.5)$$

の関係がある。

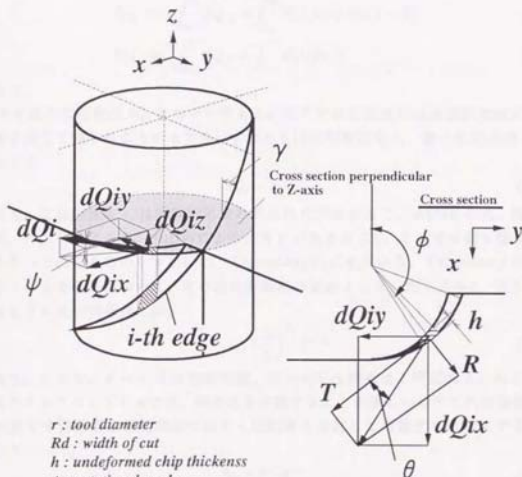
エンドミルを xy 平面に平行な平面で微小部分に分割し、 i 番目の切れ刃について、その微小切れ刃に作用する微小切削抵抗について考える。 i 番目の切れ刃の微小切削抵抗をそれぞれ dQ_{ix} 、 dQ_{iy} 、 dQ_{iz} と表す。

微小切削抵抗 dQ_i が xy 平面となす角度を ψ 、 dQ_i を xy 平面へ投影したものが微小切れ刃上の切削速度方向となす角を θ と置くと、各軸方向の微小切削抵抗は次のようになる。

$$dQ_{ix} = dQ_i \cos \psi \sin(\phi - \theta) \quad (3.6)$$

$$dQ_{iy} = dQ_i \cos \psi \cos(\phi - \theta) \quad (3.7)$$

$$dQ_{iz} = dQ_i \sin \psi \quad (3.8)$$



- r : tool diameter
 R_d : width of cut
 h : undeformed chip thickness
 ϕ : rotational angle
 dQ_i : infinitesimal cutting force of the i -th edge
 dQ_{ix} : infinitesimal cutting force of the i -th edge for x -axis
 dQ_{iy} : infinitesimal cutting force of the i -th edge for y -axis
 dQ_{iz} : infinitesimal cutting force of the i -th edge for z -axis
 ψ : angle between dQ_i and xy -plane
 θ : angle between tangential force T and $dQ_i \cos \psi$
 γ : helix angle

図 3.1 エンドミルの切削モデル

切削開始角を ϕ_a 、切削終了角を ϕ_b とすると、 i 番目の切れ刃に作用する各軸方向の切削抵抗は

$$Q_{ix} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_{ix} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_i \cos \psi \cos(\phi - \theta) \quad (3.9)$$

$$Q_{iy} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_{iy} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_i \cos \psi \sin(\phi - \theta) \quad (3.10)$$

$$Q_{iz} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_{iz} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} dQ_i \sin \psi \quad (3.11)$$

となる。

まず微小切削抵抗 dQ_i について考える。ここでは切削抵抗は比切削抵抗に切削面積を乗じて得られるものとする。すなわち比切削抵抗を k_s 、微小切削面積を dA とくと

$$dQ_i = k_s dA \quad (3.12)$$

となる。比切削抵抗 k_s は実験的に求める以外に方法がなく、ASMEの式、海老原の式、竹山らによる式、中山らによる式などがあるが[75]、ここでは最も簡単で、よく用いられるものの1つとして、Kronenbergの式を用いる。Kronenbergの式はバイトによる切削において、その比切削抵抗の算出として、切り込み t 、送り S としたときに比切削抵抗 k が、

$$k = c_{ks} \left(\frac{G}{S} \right)^{g_s} F^{-f_s} \quad (3.13)$$

となる。ここで、 $F = t \cdot S$ は切削面積、 $G = t/S$ は細長比と呼ばれる。ねじれのあるスクエアエンドミルでは、細長比を定義することが難しいのでこれは無視し、 g_s の表す寸法効果を切削面積ではなく切削厚さに対して考慮することにする。すなわち

$$k_s = C \cdot h^{-\varepsilon} \quad (3.14)$$

とする。 C および ε は工作物の材質、工具形状によって決まる定数である。

微小切削面積 dA は切削厚さを h とすると

$$dA = h \cdot dz \quad (3.15)$$

となる。切削厚さ h は工具・工作物間の相対変位が変化しないと仮定し、送り速度に対して工具の回転速度が十分に速いことを考慮すると近似的に

$$h \simeq S_z \sin \phi \quad (3.16)$$

と表せる。ここで S_z は式(3.1)に定義した一刃あたりの送り量である。よって式(3.12)、式(3.14)、式(3.15)、式(3.16)より微小切削抵抗 dQ_i は、

$$dQ_i = C(S_z \sin \phi)^{1-\varepsilon} dz \quad (3.17)$$

となる。これより各軸方向の微小切削抵抗は、

$$dQ_{ix} = CS_z^{1-\epsilon} \cos \psi \sin^{1-\epsilon} \phi \sin(\phi - \theta) dz \quad (3.18)$$

$$dQ_{iy} = CS_z^{1-\epsilon} \cos \psi \sin^{1-\epsilon} \phi \cos(\phi - \theta) dz \quad (3.19)$$

$$dQ_{iz} = CS_z^{1-\epsilon} \sin \psi \sin^{1-\epsilon} \phi dz \quad (3.20)$$

となる。

積分変数について主軸方向の微小長さ dz と微小回転角度 $d\phi$ との関係より、

$$dz = \frac{r}{\tan \gamma} d\phi \quad (3.21)$$

となる。式 (3.21) より $\tan \gamma = 0$ 、すなわち直刃のエンドミルについては別の式を定義する必要がある。直刃の場合は、主軸方向に沿って切削厚さは一定であるから、切削面積 A は

$$A = h \cdot A_d \quad (3.22)$$

と簡単に表現できるので、これに比切削抵抗 k_s を乗じて切削抵抗を得ることができる。ここでは直刃の解析は行なわずに切れ刃のみを扱うことにする。

未知パラメータのうち、 ψ, θ は切削厚さによって変化すると考えられるが、その関係を知ることは非常に難しいのでここでは以下のように切削厚さ h について1次近似を行なう。

$$\psi = \tan^{-1}(ah + b) \quad (3.23)$$

$$\theta = \tan^{-1}(ph + q) \quad (3.24)$$

a, b, p, q は未知パラメータとして実験データより計算されることになる。

これらより i 番目の切れ刃に作用する各軸方向の切削抵抗は

$$Q_{ix} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \frac{r}{\tan \gamma} CS_z^{1-\epsilon} \sin^{1-\epsilon} \phi \cos \left[\tan^{-1} \{a S_z \sin \phi + b\} \right] \sin \left[\phi - \tan^{-1} \{p S_z \sin \phi + q\} \right] d\phi \quad (3.25)$$

$$Q_{iy} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \frac{r}{\tan \gamma} CS_z^{1-\epsilon} \sin^{1-\epsilon} \phi \cos \left[\tan^{-1} \{a S_z \sin \phi + b\} \right] \cos \left[\phi - \tan^{-1} \{p S_z \sin \phi + q\} \right] d\phi \quad (3.26)$$

$$Q_{iz} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \frac{r}{\tan \gamma} CS_z^{1-\epsilon} \sin^{1-\epsilon} \phi \sin \left[\tan^{-1} \{a S_z \sin \phi + b\} \right] d\phi \quad (3.27)$$

と表される。

式 (3.25) ~ 式 (3.27) 中の積分は解析的には解くことができない。そこでここでは、Gauss-Legendre 積分公式 [83, 84] を用いて近似的に解くことを考える。Gauss-

Legendre 積分公式は、

$$\int_{-1}^1 f(x) dx \approx \sum_{i=1}^m A_i f(x_i) \quad (3.28)$$

で表される。ここで、 m は 2、4、6・・・の値をとり、 m が増加するほど精度はよくなる。 x_i 、 A_i の値は、 m によって異なる。Gauss-Legendre 積分公式では積分区間は -1 から 1 までであるので、次のような変数変換を行う。

$$\phi = \phi_a + \frac{\phi_b - \phi_a}{2}(1+x) \quad (3.29)$$

これより $\phi = \phi_a$ のとき $x = -1$ 、 $\phi = \phi_b$ のとき $x = 1$ となり、積分区間は -1 から 1 までに変換された。さらに $d\phi$ は、

$$d\phi = \frac{\phi_b - \phi_a}{2} dx \quad (3.30)$$

となる。 m についての計算誤差は $m=2$ で 1% 程度であり、測定誤差が 1% 以上あるので $m=2$ を用いることにする。このとき

$$A_{1,2} = 1.0 \quad (3.31)$$

$$x_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3.32)$$

$$x_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3.33)$$

である。したがってこれに対応する回転角度はそれぞれ以下のようにになる。

$$\phi_1 = \phi_a + \frac{\phi_b - \phi_a}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \quad (3.34)$$

$$\phi_2 = \phi_a + \frac{\phi_b - \phi_a}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \quad (3.35)$$

この近似方法を用いることにより、式 (3.25)～式 (3.27) は、以下のように計算できる形にまとめられる。

$$Q_{ix} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \quad (3.36)$$

$$Q_{iy} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \quad (3.37)$$

$$Q_{iz} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \quad (3.38)$$

と表される。

時刻 t における i 番目の切れ刃の最下部から z の位置の回転角 $\phi(i, z, t)$ について考えると

$$\phi(i, z, t) = \phi(1, 0, 0) + \frac{2\pi}{n}(i-1) - \frac{\sin \gamma}{r}z + \omega t \quad (3.39)$$

となる。 $\phi(i, z, t)$ の取り得る値については、

$$\phi_a \leq \phi(i, z, t) \leq \phi_b \quad (3.40)$$

であり、この範囲にあるとき切削厚さ h は式 (3.16) にしたがって計算され、この範囲にないとき $h = 0$ とする。

3.2.3 未知パラメータの計算方法

前節で求めた切削抵抗の式に含まれる未知パラメータ $C, \varepsilon, a, b, p, q$ を実験によって求める。パラメータが複数あり線形関係にないので、これらを決定する計算方法として、最急降下法を用いる [85]。最急降下法は、未知パラメータが作る n 次元空間において関数 $g(X)$ が作る曲面において、曲面上のある点における勾配 $\nabla g(X)$ に比例した大きさを、曲面の等高線に直交な方向で極値に近づく計算方法である。

ここでは未知変数ベクトルは

$$X = (C, \varepsilon, a, b, p, q) \quad (3.41)$$

の6次元ベクトルとおくことができる。評価関数を

$$g(X) = \sum_k (D_{x(k)} - Q_{x(k)})^2 + \sum_k (D_{y(k)} - Q_{y(k)})^2 + \sum_k (D_{z(k)} - Q_{z(k)})^2 \quad (3.42)$$

と定義する。ここに $D_{x(k)}, D_{y(k)}, D_{z(k)}$ は実験によって得た切削抵抗、 $Q_{x(k)}, Q_{y(k)}, Q_{z(k)}$ は計算によって得た切削抵抗で、添字 (k) はデータの数を表している。未知変数を求めることは評価関数 $g(X)$ が最小となるような未知変数ベクトル X を求めることになる。

勾配ベクトル $\nabla g(X)$ の各成分は以下のようになる。

$$\frac{\partial g}{\partial C} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial C} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial C} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{z(k)}}{\partial C} (Q_{z(k)} - D_{z(k)}) \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \varepsilon} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial \varepsilon} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial \varepsilon} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{z(k)}}{\partial \varepsilon} (Q_{z(k)} - D_{z(k)}) \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial g}{\partial a} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial a} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial a} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{z(k)}}{\partial a} (Q_{z(k)} - D_{z(k)}) \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial g}{\partial b} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial b} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial b} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{z(k)}}{\partial b} (Q_{z(k)} - D_{z(k)}) \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial g}{\partial p} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial p} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial p} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial g}{\partial q} = 2 \sum_k \frac{\partial Q_{x(k)}}{\partial q} (Q_{x(k)} - D_{x(k)}) + 2 \sum_k \frac{\partial Q_{y(k)}}{\partial q} (Q_{y(k)} - D_{y(k)}) \quad (3.48)$$

さらに各未知パラメータによる式(3.36)～式(3.38)に対する偏微分は以下のよう
に計算される。

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial C} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial Q_{iy}}{\partial C} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial C} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \frac{\partial Q_{ix}}{\partial \epsilon} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \ln(S_z \sin \phi_j) \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial Q_{iy}}{\partial \epsilon} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \ln(S_z \sin \phi_j) \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial \epsilon} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \ln(S_z \sin \phi_j) \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial a} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{S_z \sin \phi_j}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial Q_{iy}}{\partial a} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{S_z \sin \phi_j}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial a} = \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ \times \frac{S_z \sin \phi_j}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial Q_{ix}}{\partial b} = -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_s}{2} C S_z^{1-\epsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\epsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right]$$

$$\times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{1}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iy}}{\partial b} = & -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \sin \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{1}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iz}}{\partial b} = & \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \frac{1}{1 + (a S_z \sin \phi_j + b)^2} \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iz}}{\partial p} = & -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{S_z \sin \phi_j}{1 + (p S_z \sin \phi_j + q)^2} \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iy}}{\partial p} = & \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{S_z \sin \phi_j}{1 + (p S_z \sin \phi_j + q)^2} \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iz}}{\partial q} = & -\frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \cos \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{1}{1 + (p S_z \sin \phi_j + q)^2} \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{iy}}{\partial q} = & \frac{r}{\tan \gamma} \frac{\phi_b - \phi_a}{2} C S_z^{1-\varepsilon} \sum_{j=1}^2 \sin^{1-\varepsilon} \phi_j \cos \left[\tan^{-1} \{ a S_z \sin \phi_j + b \} \right] \\ & \times \sin \left[\phi_j - \tan^{-1} \{ p S_z \sin \phi_j + q \} \right] \frac{1}{1 + (p S_z \sin \phi_j + q)^2} \end{aligned} \quad (3.63)$$

具体的な計算は以下の手順で実行される。

1. 初期値 X_0 、収束条件 δ 、ゲイン定数ベクトル K^T を設定する。
2. 式 (3.36) ～ 式 (3.38) により切削抵抗を計算する。
3. 式 (3.43) ～ 式 (3.48) により勾配ベクトル $\nabla g(X)$ を計算する。
4. $\|\nabla g\|^2 < \delta$ の収束条件をチェックする。 $\|\nabla g\|^2$ は

$$\|\nabla g\|^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial C} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial a} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial b} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial q} \right)^2 \quad (3.64)$$

により計算される。

5. 収束条件が満たされない場合、

$$X_{k+1} = X_k + K \cdot \nabla g \quad (3.65)$$

により変数ベクトルを修正し2.に戻る。

3.2.4 計算結果

前節で示した計算方法にしたがって、パラメータの計算を行なった。工具はφ15のスクエアエンドミルを選び、工作物はA2017のものを用意し、切削深さを種々に変えて、y軸正方向に溝切削を行ない切削力を測定した。切削条件は各実験結果を示すグラフに併記した。

計算においてどの場合も初期値、ゲインベクトル、収束条件を以下のように設定した。

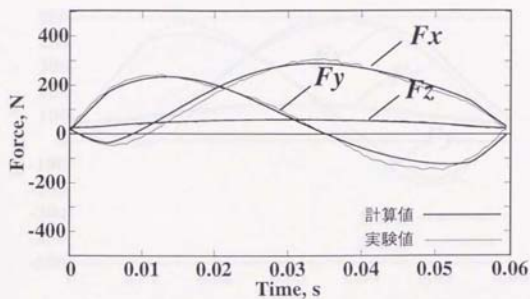
$$X_0 = (400, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0) \quad (3.66)$$

$$K^T = [10.0, 1.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-2}] \quad (3.67)$$

$$\delta = 1.0 \times 10^4 \quad (3.68)$$

図 3.2～図 3.6に計算結果と実験値の比較を示す。

いずれの場合も実験値と計算値がよく一致しており、切削条件を決定する場合に切削力を予測するという目的には十分であると考えられる。



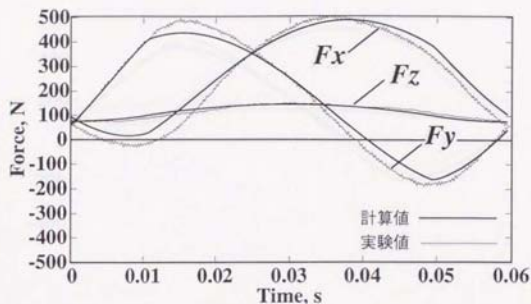
実験条件

工具径	φ 15	ねじれ角	40°
送り速度	60mm/min	主軸回転数	500rpm
切削深さ	5mm	切削形式	溝切削

計算結果

C [N/mm ²]	ε	a	b	p	q
157	0.655	0.533	0.162	-8.75	0.762

図 3.2 物理モデルの計算結果と実験値との比較



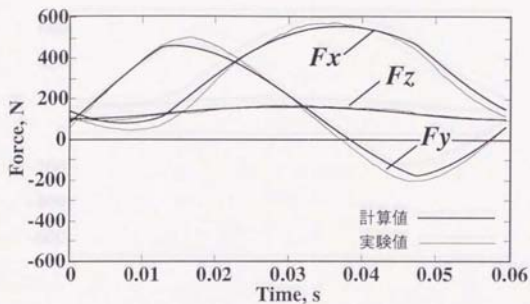
実験条件

工具径	φ 15	ねじれ角	40°
送り速度	60mm/min	主軸回転数	500rpm
切削深さ	10mm	切削形式	溝切削

計算結果

C [N/mm ²]	ϵ	a	b	p	q
120	0.726	1.73	0.172	-1.59	0.663

図 3.3 物理モデルの計算結果と実験値との比較



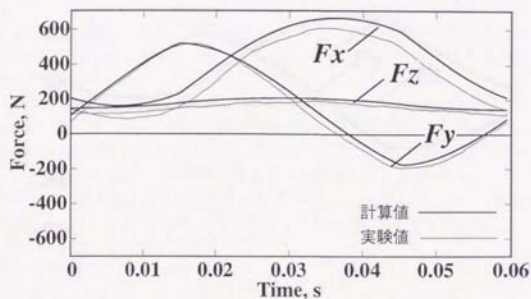
実験条件

工具径	φ 15	ねじれ角	40°
送り速度	60mm/min	主軸回転数	500rpm
切削深さ	12mm	切削形式	溝切削

計算結果

C [N/mm ²]	ϵ	a	b	p	q
102	0.765	1.35	0.188	-6.15	0.753

図 3.4 物理モデルの計算結果と実験値との比較



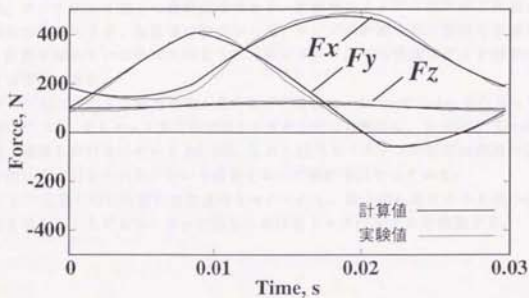
実験条件

工具径	φ 15	ねじれ角	40°
送り速度	60mm/min	主軸回転数	500rpm
切削深さ	14mm	切削形式	溝切削

計算結果

C [N/mm ²]	ε	a	b	p	q
121	0.726	0.763	0.236	-5.46	0.685

図 3.5 物理モデルの計算結果と実験値との比較



実験条件

工具径	$\phi 15$	ねじれ角	40°
送り速度	60mm/min	主軸回転数	1000rpm
切削深さ	16mm	切削形式	溝切削

計算結果

C [N/mm ²]	ε	a	b	p	q
75	0.796	0.253	0.204	-0.387	0.548

図 3.6 物理モデルの計算結果と実験値との比較

3.3 タップ加工の物理モデル

タップ加工中の折損は、他の工具に比べて頻繁に生じ、加工現場では小径タップの無人加工はできるだけ避けるという消極的な方法で対処しているのが現状である。タップ加工は加工の最終段階であり、折損後のタップの破片が工作物から容易には除去できず、生産性の観点からも、タップの折損予知は重要な意義を持つ。折損予知あるいは検知を行なうためにはタップ加工の物理モデルを解明することが重要である。

タップ加工を行なう場合の加工条件などの分析は、DykeやBakerが行なっている[86, 87, 88]。またタップ加工の切削トルクについての解析は、Schröder, Stower、斉藤、隅部らが行なっている[89, 90]。しかし彼らは「タップの切削は無限の連続した切れ刃で行なわれる」という仮定をおいて解析を行なっている。

ここでは個々の切れ刃の切削過程をモデル化し、微小切れ刃にかかる微小切削抵抗を考えることにより、タップ加工におけるトルクのモデルを構築する。

3.3.1 切削機構の解明

タップ加工はタップ先端の食いつき部の複数切れ刃によって行なわれる。

わかりやすくするために、切削機構を図 3.7 のように 2 次的に表現して考えることにする。図 3.7 は、3 溝、食いつき山数 4 の直溝ハンドタップをモデルにしている。工具側が固定していると考えて、斜線部で示した下穴 (工作物表面) が z 軸正方向に送り f で進むものとする。1 つの連続したスパイラル状のねじ溝を山 1 から山 15 が順番に切削していき、16 番目の山からはねじ溝をなぞる (パニッシュ仕上げ) だけである。

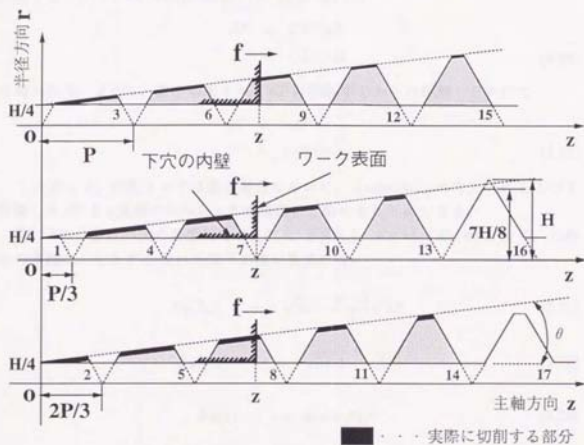
実際に加工を行なう部分は黒く塗りつぶした部分だけであり、この部分を全て合わせると、一つの完全なねじ山の形になる。図 3.7 の全ての要素は P (ピッチ) だけを用いて表せるので、切削力と切削トルクは P だけの関数として表せる。ただし、時間軸は回転数 (N) によって決まる。

下穴が図 3.7 の z 座標の z の位置にある時の切れ刃における微小切削面積 (または、切削断面積) について考える。

切削抵抗については 3.2.2 と同様の考え方を適用する。比切削抵抗を以下のように仮定する。

$$k_s = C h^{-\varepsilon} \quad (3.69)$$

ここで、 C 、 ε は切れ刃形状、工作物の材質などに依存する定数である。



P : ピッチ

f : 送り速度 ($f = N \cdot P / 60 [\text{mm/sec}]$)

N : 回転数 [min^{-1}]

H : 山の高さ ($\sqrt{3}P/2$)

θ : 食い付き角 ($\tan \theta = 0.1282$)

図 3.7 タップ加工の切削機構

さて、図 3.8において、微小面積 dS に働く切削力を dF とすると、Kronenberg の式により

$$dF = k_s dS \quad (3.67)$$

となる。また、図 3.8より

$$dS = h dz \quad (3.68)$$

が成り立つので、式 (3.66)、式 (3.67)、式 (3.68) より

$$\begin{aligned} dF &= Ch^{-\epsilon} dS \\ &= Ch^{1-\epsilon} dz \end{aligned} \quad (3.69)$$

が導かれる。よって、微小切削トルク dT は回転中心からの距離 r をかけて

$$\begin{aligned} dT &= r dF \\ &= r Ch^{1-\epsilon} dz \end{aligned} \quad (3.70)$$

したがって、切削トルクは微小部分において、Kronenberg の考え方にもとづき計算した dT を z 座標の 0 から z まで積分して求めることができる。

図 3.9の n 番目の山の各直線を $Eq(L_n)$ 、 $Eq(R_n)$ 、 $Eq(k)$ 、 $Eq(k')$ とする。これらの直線は、 n と P を用いて以下の様に表される。

$$Eq(L_n) : r = \sqrt{3}z - \frac{n-3}{3}\sqrt{3}P \quad (3.71)$$

$$Eq(R_n) : r = -\sqrt{3}z + \frac{n}{3}\sqrt{3}P \quad (3.72)$$

$$Eq(k) : r = A_k z + B_k P \quad (3.73)$$

$$Eq(k') : r = A_{k'} z + B_{pk} P \quad (3.74)$$

ただし、 A_k 、 B_k 、 B_{pk} は

$$A_k = \tan \theta = 0.1282 \quad (3.75)$$

$$B_k = 0.2165 \quad (3.76)$$

$$B_{pk} = 0.1737 \quad (3.77)$$

である。

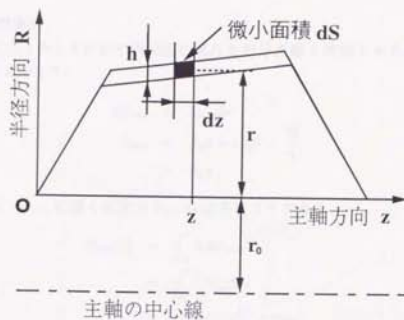


図 3.8 切削面積における微小部分

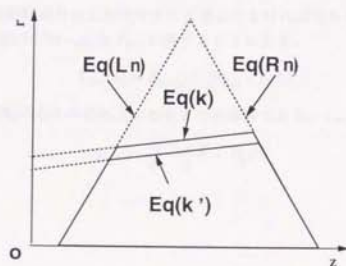


図 3.9 タップの刃先を構成する直線の定義

切削厚さ h の形状によって、切削トルク T を T_{init} 、 T_{left} 、 T_{middle} 、 T_{right} 、 T_{end} の5つの部分に分類して、切削トルクを算出していく。

1) $T_{init}(z)$ の算出

$T_{init}(z)$ は山1から3だけに限定的に現れる部分に働く切削トルクである。

まず、図3.10より、

$$dS_{init} = h_{init} dz \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} h_{init} &= A_k z + B_k P - \frac{H}{4} \\ &= A_k z \end{aligned} \quad (3.79)$$

となるので、 dS_{init} に働く切削力 F_{init} は以下ようになる。

$$\begin{aligned} F_{init}(z) &= \int_{z_1}^z k_t dS_{init} \\ &= \int_{z_1}^z C h_{init}^{1-\varepsilon} dz \\ &= C \cdot A_k^{1-\varepsilon} \int_{z_1}^z z^{1-\varepsilon} dz \\ &= \frac{C \cdot A_k^{1-\varepsilon}}{2-\varepsilon} \left[z^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \\ &= \frac{C \cdot A_k^{1-\varepsilon}}{2-\varepsilon} (z^{2-\varepsilon} - z_1^{2-\varepsilon}) \end{aligned} \quad (3.80)$$

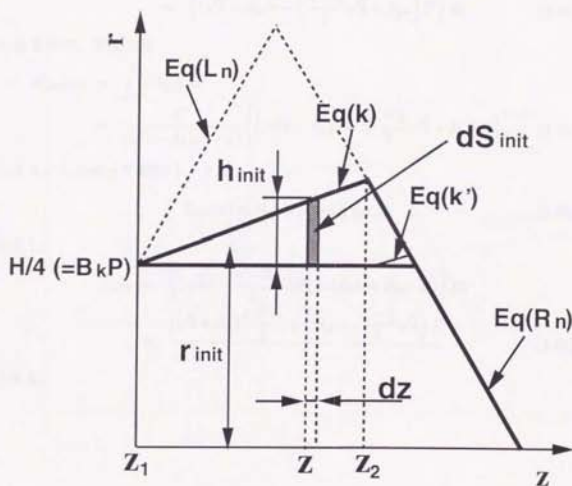
厳密には半径距離成分は上の式ですでに乘じてなければならないが、積分計算の簡単のため、図3.10の r_{init} を F_{init} に乗ずることにする。

$$T_{init}(z) = F_{init}(z) \cdot (r_{init} + r_0) \quad (3.81)$$

ただし、 r_0 は回転中心から切れ刃山の谷までの距離であり、 r_{init} は、

$$r_{init} = \frac{A_k z_1 + z}{2} + B_k P \quad (3.82)$$

である。

図 3.10 微小部分 dS_{init}

2) $T_{left}(z)$ の算出

$T_{left}(z)$ は図 3.11 に示す部分に働く切削トルクであり、山 3～15 に現れる。

図 3.11 により、

$$\begin{aligned} dS_{left} &= h_{left} dz \\ &= \left\{ \sqrt{3}z - \frac{n-3}{3}\sqrt{3}P - (A_k z + B_{pk}P) \right\} dz \\ &= \left\{ (\sqrt{3} - A_k)z - \left(\frac{n-3}{3}\sqrt{3} + B_{pk} \right) P \right\} dz \end{aligned} \quad (3.83)$$

となるので、切削力は

$$\begin{aligned} F_{left}(z) &= \int_{z_1}^z C h_{left}^{-1/2} dz \\ &= \frac{C}{(\sqrt{3} - A_k)(2 - \varepsilon)} \left[\left\{ (\sqrt{3} - A_k)z - \left(\frac{n-3}{3}\sqrt{3} + B_{pk} \right) P \right\}^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \end{aligned} \quad (3.84)$$

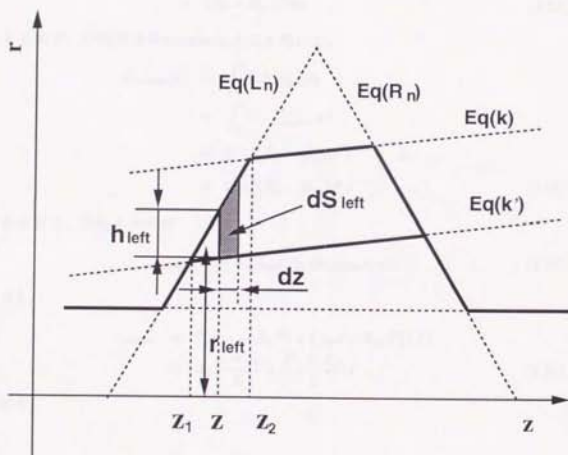
となり、したがって切削トルクは

$$T_{left}(z) = F_{left}(z) \cdot (r_{left} + r_0) \quad (3.85)$$

ただし、

$$\begin{aligned} r_{left} &= \left\{ \left(\sqrt{3}z - \frac{n-3}{3}\sqrt{3}P \right) + (A_k z + B_{pk} \cdot P) \right\} / 2 \\ &= \frac{(\sqrt{3} + A_k) \frac{z + z_1}{2} + \left(B_{pk} - \frac{n-3}{3}\sqrt{3} \right) P}{2} \end{aligned} \quad (3.86)$$

である。

図 3.11 微小部分 dS_{left}

3) $T_{middle}(z)$ の算出

$T_{middle}(z)$ は図 3.12 に示す部分に働く切削トルクであり、山 2 ～ 15 に現れ、図 3.7 に示すように切削面積のほとんどがこの部分である。よって、全体の $T(z)$ のほとんどの部分がこの T_{middle} で占められる。図 3.12 より、

$$\begin{aligned} dS_{middle} &= h_{middle} dz \\ &= \{(A_k z + B_k P) - (A_k z + B_{pk} P)\} dz \\ &= (B_k - B_{pk}) P dz \end{aligned} \quad (3.87)$$

となるので、切削力は Kronenberg の式を用いて、

$$\begin{aligned} F_{middle}(z) &= \int_{z_1}^z k_s h_{middle} dz \\ &= \int_{z_1}^z C \cdot h_{middle}^{1-\epsilon} dz \\ &= C \cdot \{(B_k - B_{pk}) P\}^{1-\epsilon} \int_{z_1}^z dz \\ &= C \cdot \{(B_k - B_{pk}) P\}^{1-\epsilon} (z - z_1) \end{aligned} \quad (3.88)$$

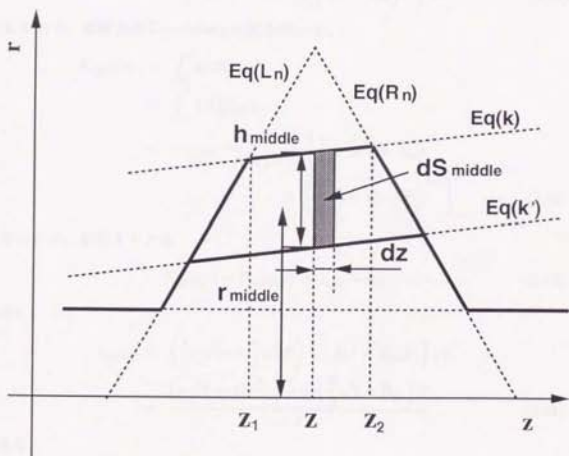
とあらわせ、切削トルクは

$$T_{middle}(z) = F_{middle}(z) \cdot (r_{middle} + r_0) \quad (3.89)$$

ただし、

$$\begin{aligned} r_{middle} &= \{(A_k z + B_k P) + (A_k z + B_{pk} P)\} / 2 \\ &= A_k \frac{z_1 + z_0}{2} + \frac{B_k + B_{pk}}{2} P \end{aligned} \quad (3.90)$$

である。

図 3.12 微小部分 dS_{middle}

4) $T_{right}(z)$ の算出

$T_{right}(z)$ は図 3.13 に示す部分に働く切削トルクであり、山 3 ~ 15 に現れる。
図 3.13 により、

$$\begin{aligned} dS_{right} &= h_{right} \cdot dz \\ &= \left\{ (-\sqrt{3}z + \frac{n}{3}\sqrt{3}P) - (A_k z + B_{pk}P) \right\} dz \\ &= \left\{ -(\sqrt{3} + A_k)z + \left(\frac{n}{3}\sqrt{3} - B_{pk} \right) P \right\} dz \end{aligned} \quad (3.91)$$

となるので、切削力は Kronenberg の式を用いて、

$$\begin{aligned} F_{right}(z) &= \int_{z_1}^z k_s dS_{right} \\ &= \int_{z_1}^z C h_{right}^{1-\varepsilon} dz \\ &= -\frac{C}{(\sqrt{3} + A_k)(2-\varepsilon)} \left[\left\{ -(\sqrt{3} + A_k)z \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{n}{3}\sqrt{3} - B_{pk} \right) P \right\}^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \end{aligned} \quad (3.92)$$

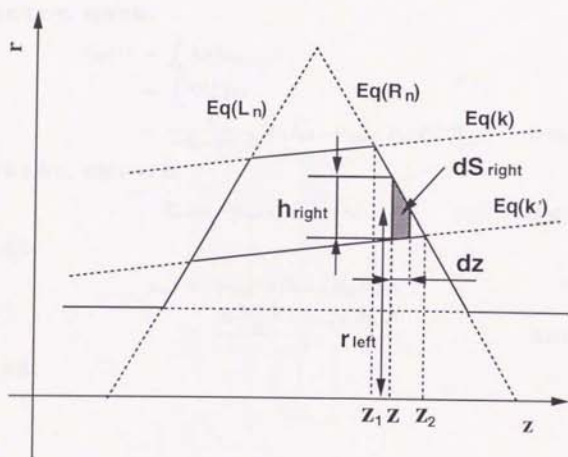
とあわせて、切削トルクは

$$T_{right}(z) = F_{right}(z) \cdot (r_{right} + r_0) \quad (3.93)$$

ただし、

$$\begin{aligned} r_{right} &= \left\{ \left(-\sqrt{3}z + \frac{n}{3}\sqrt{3}P \right) + (A_k z + B_{pk}P) \right\} / 2 \\ &= \frac{(-\sqrt{3} + A_k) \frac{z_1 + z}{2} + \left(\frac{n}{3}\sqrt{3} + B_{pk} \right) P}{2} \end{aligned} \quad (3.94)$$

である。

図 3.13 微小部分 dS_{right}

5) $T_{end}(z)$ の算出

$T_{end}(z)$ は図 3.14 に示す部分に働く切削トルクであり、山15だけに現れる。
図 3.14 により、

$$\begin{aligned} dS_{end} &= h_{end} dz \\ &= \{r_{end}P - (A_k z + B_{pk}P)\} dz \\ &= \{-A_k z + (r_{end} - B_{pk})P\} dz \end{aligned} \quad (3.95)$$

となるので、切削力は、

$$\begin{aligned} F_{end}(z) &= \int_{z_1}^z k_s dS_{end} \\ &= \int_{z_1}^z C h_{end}^{1-\varepsilon} dz \\ &= \frac{C}{-A_k \cdot (2-\varepsilon)} \left[\{-A_k z + (r_{end} - B_{pk})P\}^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \end{aligned} \quad (3.96)$$

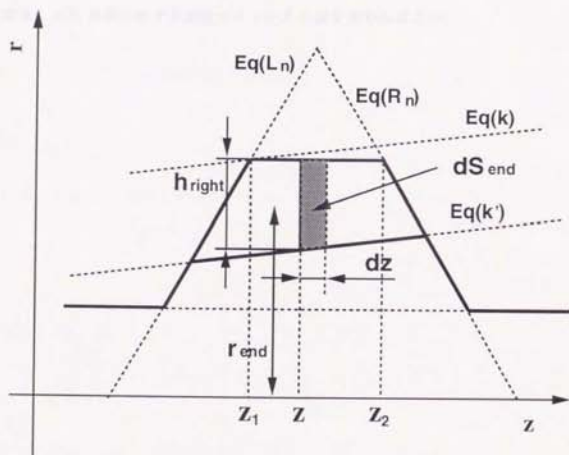
となるので、切削トルクは

$$T_{end}(z) = F_{end}(z) \cdot (r_{end} + r_0) \quad (3.97)$$

ただし、

$$\begin{aligned} r_{end} &= \{r_{end}P + (A_k z + B_{pk}P)\} / 2 \\ &= \frac{A_k \frac{z_1 + z_2}{2} + (r_{end} + B_{pk})P}{2} \end{aligned} \quad (3.98)$$

である。

図 3.14 微小部分 dS_{end}

3.3.2 未知パラメータの決定

こうして求めた近似式と実験値を用いて、 ϵ と C を求める。計算は、3.2.3と同様に最急降下法を用いて行う。

いくつかの切削条件 i について、実験データ値を D_i 、計算値を F_i とおき変数ベクトル X に対して評価関数 $g(X)$ を

$$g(X) = \sum_i (D_i - F_i)^2 \quad (3.99)$$

とおき、 $g(X)$ を最小にする変数ベクトル X の値を求めればよい。

以下、 $T_{init}(z)$ 、 $T_{left}(z)$ 、 $T_{middle}(z)$ 、 $T_{right}(z)$ 、 $T_{end}(z)$ について、それぞれ、 C 、 ε による偏導関数を求めていく。

1) $T_{init}(z)$ の C 、 ε による偏導関数 $\frac{\partial T_{init}(z)}{\partial C}$ 、 $\frac{\partial T_{init}(z)}{\partial \varepsilon}$ を求める。

$$\begin{aligned} T_{init}(z) &= (r_{init} + r_0) \cdot F_{init}(z) \\ &= \left(\frac{A_k z_{mid} + 2B_k P}{2} + r_0 \right) F_{init}(z) \end{aligned} \quad (3.100)$$

ただし

$$z_{mid} = \frac{z_1 + z}{2} \quad (3.101)$$

である。ここで C と ε に関係ない定数部分を

$$R_{init} = \frac{A_k z_{mid} + 2B_k P}{2} + r_0 \quad (3.102)$$

とわくと、

$$T_{init}(z) = R_{init} F_{init}(z) \quad (3.103)$$

となり、これより、偏導関数を求めると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{init}(z)}{\partial C} &= \frac{\partial}{\partial C} \left\{ R_{init} \frac{CA_k^{1-\varepsilon}}{2-\varepsilon} (z^{2-\varepsilon} - z_1^{2-\varepsilon}) \right\} \\ &= \frac{R_{init} A_k^{1-\varepsilon}}{2-\varepsilon} (z^{2-\varepsilon} - z_1^{2-\varepsilon}) \end{aligned} \quad (3.104)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{init}(z)}{\partial \varepsilon} &= -C \cdot R_{init} \left[\frac{A_k^{1-\varepsilon} (\log A_k + \log z)}{2-\varepsilon} - \frac{A_k^{1-\varepsilon}}{(\varepsilon-2)^2} \right] \cdot z^{2-\varepsilon} \\ &\quad + C \cdot R_{init} \left[\frac{A_k^{1-\varepsilon} (\log A_k + \log z_1)}{2-\varepsilon} - \frac{A_k^{1-\varepsilon}}{(\varepsilon-2)^2} \right] \cdot z_1^{2-\varepsilon} \end{aligned} \quad (3.105)$$

となる。

2) $T_{left}(z)$ の C 、 ε による偏導関数 $\frac{\partial T_{left}(z)}{\partial C}$ 、 $\frac{\partial T_{left}(z)}{\partial \varepsilon}$ を求める。

$$\begin{aligned} T_{left}(z) &= (r_{left} + r_0) \cdot F_{left}(z) \\ &= R_{left} F_{left}(z) \end{aligned} \quad (3.106)$$

ただし

$$R_{left}(z) = \frac{(\sqrt{3} + A_k) z_{mid} + \left(B_{pk} - \frac{n-3}{3} \sqrt{3} \right) P}{2} + r_0 \quad (3.107)$$

ここで

$$a = \sqrt{3} - A_k \quad (3.108)$$

$$b_n = \left(\frac{\sqrt{3}}{3}n - \sqrt{3} + B_{pk} \right) P \quad (3.109)$$

とおくと、偏導関数はそれぞれ、

$$\frac{\partial T_{left}(z)}{\partial C} = \frac{R_{left}}{a(2-\varepsilon)} \left[(az - b_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \quad (3.110)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{left}(z)}{\partial \varepsilon} = & \frac{R_{left}C}{a} \left\{ \frac{1}{(2-\varepsilon)^2} \left[(az - b_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1}^z \right\} \\ & + \frac{R_{left}C}{a} \left\{ \frac{1}{2-\varepsilon} \left[-(az - b_n)^{2-\varepsilon} \log(az - b_n) \right]_{z_1}^z \right\} \end{aligned} \quad (3.111)$$

となる。

- 3) $T_{middle}(z)$ の C, ε による偏導関数 $\frac{\partial T_{middle}(z)}{\partial C}, \frac{\partial T_{middle}(z)}{\partial \varepsilon}$ を求める。

$$\begin{aligned} T_{middle}(z) &= (r_{mid} + r_0) \cdot F_{middle}(z) \\ &= R_{middle} F_{middle}(z) \end{aligned} \quad (3.112)$$

ただし

$$R_{middle} = \frac{2A_k z_{mid} + (B_k + B_{pk})P}{2} \quad (3.113)$$

と置き換える。偏導関数はそれぞれ、

$$\frac{\partial T_{middle}(z)}{\partial C} = R_{middle} (B_k - B_{pk})^{1-\varepsilon} (z - z_1) \quad (3.114)$$

$$\frac{\partial T_{middle}(z)}{\partial \varepsilon} = -R_{middle} C (B_k - B_{pk})^{1-\varepsilon} \log(B_k - B_{pk})(z - z_1) \quad (3.115)$$

と計算できる。

- 4) $T_{right}(z)$ の C, ε による偏導関数 $\frac{\partial T_{right}(z)}{\partial C}, \frac{\partial T_{right}(z)}{\partial \varepsilon}$ を求める。

$$\begin{aligned} T_{right}(z) &= (r_{right} + r_0) \cdot F_{right}(z) \\ &= R_{right} F_{right}(z) \end{aligned} \quad (3.116)$$

ただし

$$R_{right} = \frac{(A_k - \sqrt{3})z_{mid} + \left(\frac{n}{3}\sqrt{3} + B_{pk} \right)P}{2} + r_0 \quad (3.117)$$

ここで

$$e = -(\sqrt{3} + A_k) \quad (3.118)$$

$$f_n = \left(\frac{n}{3} \sqrt{3} - B_{pk} \right) P \quad (3.119)$$

とおくと

$$\frac{\partial T_{right}(z)}{\partial C} = \frac{R_{right}}{a(2-\varepsilon)} \left[(ez + f_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1} \quad (3.120)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{right}(z)}{\partial \varepsilon} &= \frac{R_{right} \cdot C}{a} \left\{ \frac{1}{(2-\varepsilon)^2} \left[(ez + f_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1} \right\} \\ &+ \frac{R_{right} \cdot C}{a} \left\{ -\frac{1}{2-\varepsilon} \left[-(ez + f_n)^{2-\varepsilon} \log(ez + f_n) \right]_{z_1} \right\} \quad (3.121) \end{aligned}$$

となる。

5) $T_{end}(z)$ の C, ε による偏導関数 $\frac{\partial T_{end}(z)}{\partial C}, \frac{\partial T_{end}(z)}{\partial \varepsilon}$ を求める。

$$\begin{aligned} T_{end}(z) &= (r_{end} + r_0) \cdot F_{end}(z) \\ &= R_{end} F_{end}(z) \quad (3.122) \end{aligned}$$

ただし

$$R_{end} = \frac{A_k z_{mid} + (B_{pk} + D_{end})P}{2} \quad (3.123)$$

ここで

$$u = -A_k \quad (3.124)$$

$$v_n = \frac{7}{8} H - B_{pk} \quad (3.125)$$

とおく。

$$\frac{\partial T_{end}(z)}{\partial C} = \frac{1}{u(2-\varepsilon)} \left[(uz + v_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1} \quad (3.126)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{end}(z)}{\partial \varepsilon} &= \frac{R_{end} C}{u} \left\{ \frac{1}{(2-\varepsilon)^2} \left[(uz + v_n)^{2-\varepsilon} \right]_{z_1} \right\} \\ &+ \frac{R_{end} C}{u} \left\{ \frac{1}{2-\varepsilon} \left[-(uz + v_n)^{2-\varepsilon} \log(uz + v_n) \right]_{z_1} \right\} \quad (3.127) \end{aligned}$$

この場合、式 (3.99) の D_i を食い付き部分が全て切削を行なっている切削トルクが一定の部分の値を用い、 F_i に $T_{in}(z_2)$ 、 $T_{left}(z_2)$ 、 $T_{middle}(z_2)$ 、 $T_{right}(z_2)$ 、 $T_{end}(z_2)$ の山1～15の総和を用いる。つまり、図 3.15の円で囲んだ2点を一致させるようにパラメータを決定する。この2点で理論値と実験値を一致させると、他の部分でも、複数切れ刃の C と ϵ が全て同じ値であるというこの理論の仮定が正しいとすれば、うまく一致するはずである。

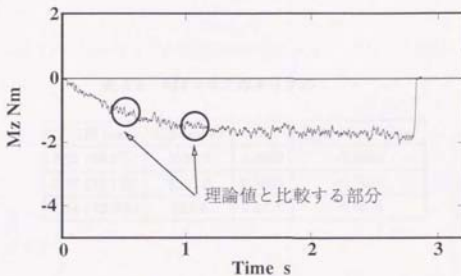


図 3.15 パラメータ決定のための実験値の抽出部分

初期値、ゲイン定数、収束条件はそれぞれ、

$$C = 1000.0 \quad (3.128)$$

$$\varepsilon = 0.26 \quad (3.129)$$

$$\alpha = [0.01 \text{ (for } C), 0.00000001 \text{ (for } \varepsilon)] \quad (3.130)$$

$$\delta = 0.0001 \quad (3.131)$$

と設定した。各パラメータの計算結果を表 3.1、表 3.2 に示す。ただし、表中の「最大トルク」はトルクが一定状態になった時の値を意味する。

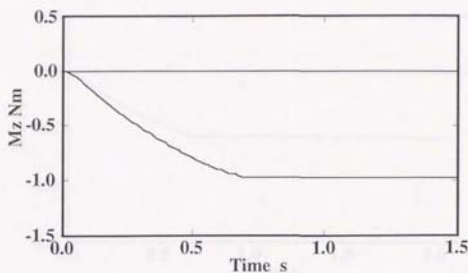
これらのパラメータを用いて求めた理論値を図 3.16～図 3.21 に載せる。ただし、M4 に関しては回転数を $400[\text{min}^{-1}]$ (切削速度 $5.02[\text{m}/\text{min}^{-1}]$)、M6 に関しては $266[\text{min}^{-1}]$ (切削速度 $5.02[\text{m}/\text{min}^{-1}]$) と仮定している。

表 3.1 M4 × 0.7 のタップの C 、 ε

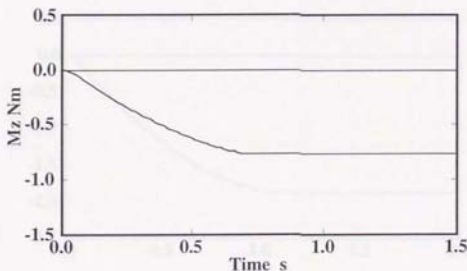
下穴径 [mm]	$C[\text{N}/\text{mm}^2]$	ε	最大トルク [Nm]
3.25 (98.9%)	1056.3	0.3683	-0.9432
3.37 (83.1%)	1033.8	0.3009	-0.7663
3.44 (73.9%)	937.8	0.2379	-0.5678

表 3.2 M6 × 1.0 のタップの C 、 ε

下穴径 [mm]	$C[\text{N}/\text{mm}^2]$	ε	最大トルク [Nm]
4.93 (98.9%)	1039.8	0.3210	-1.8731
5.10 (83.1%)	1008.1	0.2896	-1.4466
5.20 (73.9%)	993.1	0.1903	-1.2581

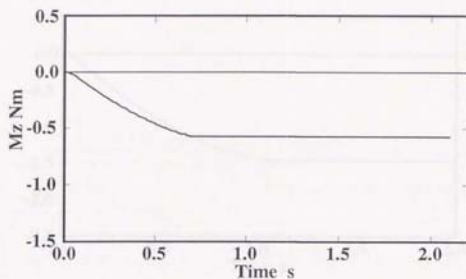


$$C : 1056.3 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.3683$$

図 3.16 M4 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 ϕ 3.25)

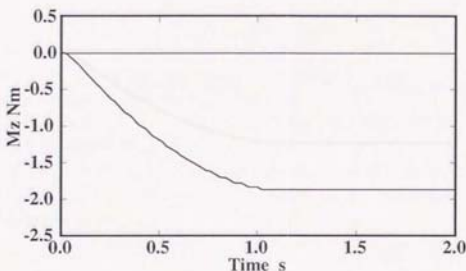
$$C : 1033.8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.3009$$

図 3.17 M4 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 ϕ 3.37)



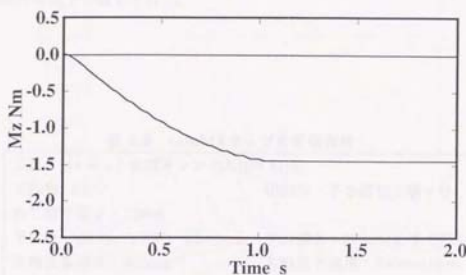
$C : 938.8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.2379$

図 3.18 M4 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 $\phi 3.44$)

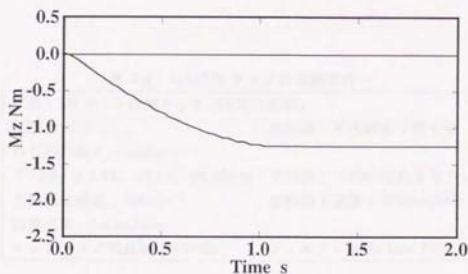


$C : 1039.8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.3120$

図 3.19 M6 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 $\phi 4.93$)



$$C : 1008.1 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.2896$$

図 3.20 M6 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 $\phi 5.10$)

$$C : 993.1 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \varepsilon : 0.1903$$

図 3.21 M6 タップの切削トルクの理論値 (下穴径 $\phi 5.20$)

次に理論値と実験値との比較の結果を図 3.22～図 3.27 に示す。上段が理論値、中段が実験値、下段が両者の重ね合わせである。

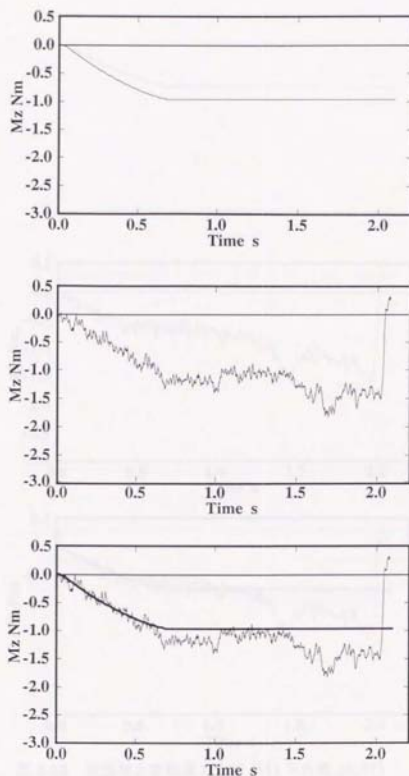
切削条件は以下の通りである。

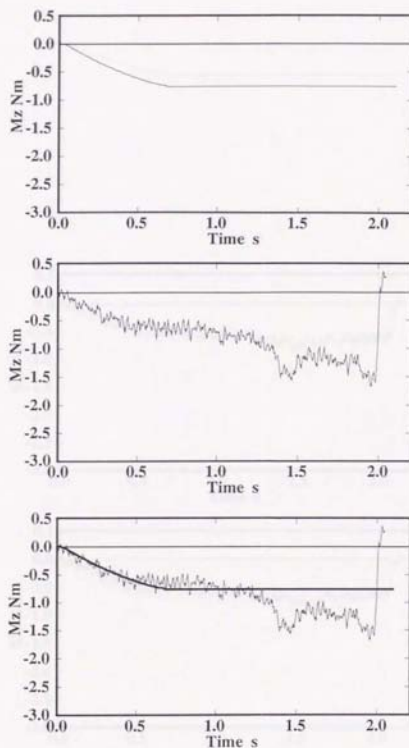
表 3.3 tab:M4 タップの切削条件

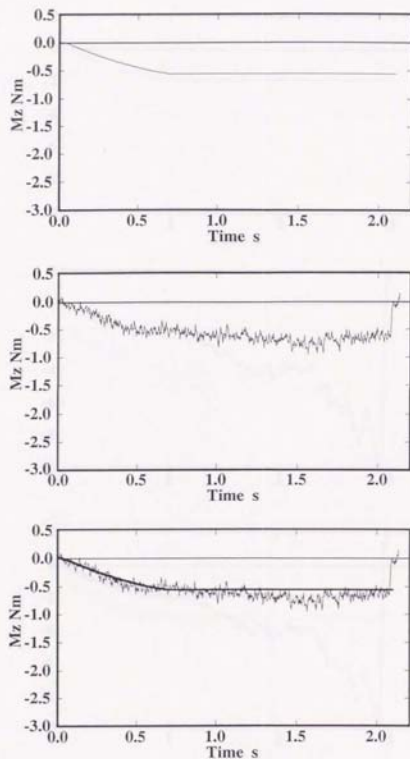
工具: M4 × 0.7 直溝タップ (SKH58 相当)	
工作物: S45C	切削油: 不溶性 2 種 4 号
ねじ部の長さ: 12mm	
下穴径: $\phi 3.25$ 、 $\phi 3.37$ 、 $\phi 3.44$ mm	下穴深さ: 20mm(止まり穴)
主軸回転速度: 400min^{-1}	主軸送り速度: 280mm/min
切削速度: 5.02m/min	
サンプリング周波数: 0.5kHz	フィルタ: 30Hz Low Pass

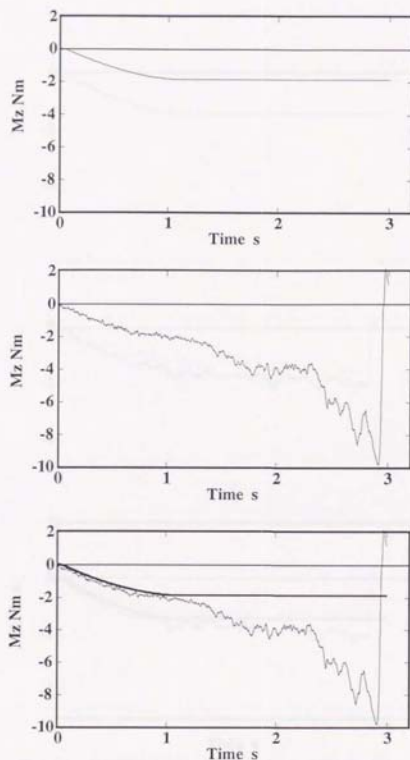
表 3.4 tab:M6 タップの切削条件

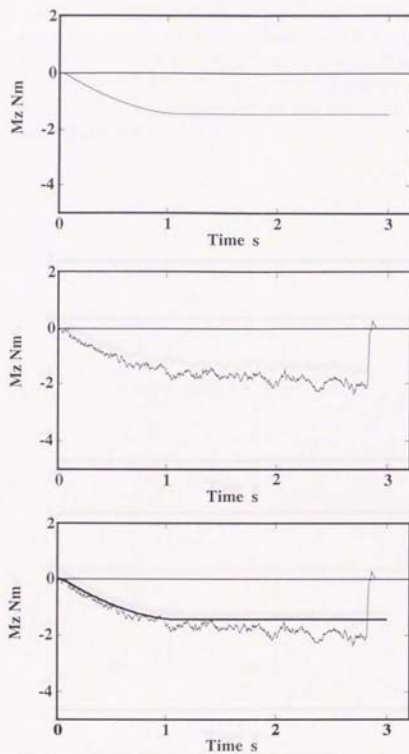
工具: M6 × 1.0 直溝タップ (SKH58 相当)	
工作物: S45C	切削油: 不溶性 2 種 4 号
ねじ部の長さ: 16mm	
下穴径: $\phi 4.93$ 、 $\phi 5.10$ 、 $\phi 5.20$ mm	下穴深さ: 20mm(止まり穴)
主軸回転速度: 266min^{-1}	主軸送り速度: 266mm/min
切削速度: 5.02m/min	
サンプリング周波数: 0.5kHz	フィルタ: 30Hz Low Pass

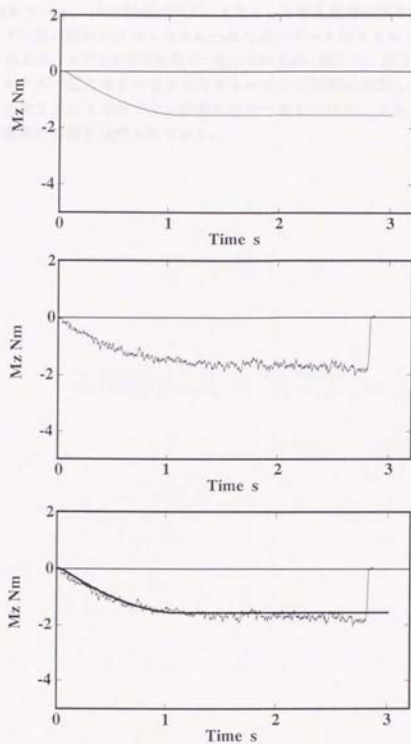
図 3.22 理論値と実験値の比較 (M4 下穴径 $\phi 3.25$)

図 3.23 理論値と実験値の比較 (M4 下穴径 $\phi 3.37$)

図 3.24 理論値と実験値の比較 (M4 下穴径 $\phi 3.44$)

図 3.25 理論値と実験値の比較 (M6 下穴径 $\phi 4.93$)

図 3.26 理論値と実験値の比較 (M6 下穴径 $\phi 5.10$)

図 3.27 理論値と実験値の比較 (M6 下穴径 $\phi 5.20$)

各下穴径について、10回程度ずつデータをとって最も正常切削に近いものと比較したが、下穴径の条件がきつくなるにつれて良いデータはとりにくくなった。

図3.24、図3.26、3.27では非常に良く一致しているが、図3.22、図3.23、図3.25では、切削トルクが一定になるべきところでトルクが不規則に変動している。しかし、トルクの立ち上がり部分では、非常に良く一致していて、トルクに関する物理モデルの構築の目標は達成されている。

第 4 章

実時間加工状態判定

4.1 従来の研究

第3章では加工現象を解明することによって、物理現象が発する信号のうちどの信号に着目すれば有用な情報を得ることができるかが考察された。次に問題となるのは、着目した信号をどのように処理し扱えば有用な情報を取り出すことができるか、ということである。

FMCやFMSといった生産システムの自動化にともない、工作機械の運転状態や切削工具の状態、あるいは切削状態の監視を行なうための技術の開発が重要な課題の一つとなってきた。これまでも加工状態の判定、異常加工の検知、予知を行なうために加工機械に種々のセンサを取り付け、センサからの情報をさまざまな処理して研究が行われてきた。センサ情報の処理方法として、人間がその特徴を捉えることによって加工状態の判定の良否を議論することが多く行われてきた。

しかしながら、実際に自動化された生産システムにこのような技術を適用するにあたっては、異常加工を回避できるという意味で実時間処理でき、判定においては定量的に評価できることが非常に重要な点になる。特に処理結果が特定の物理現象を表していることは、その結果にしたがって加工機械を制御するときに非常に有効である。

特に加工システムが加工中に生じる現象をセンサ情報から獲得し、その結果にしたがって動作を決定するためには、

- ・実時間でセンサ情報を処理できること、
- ・実時間で加工状態を判定できること、
- ・多くの種類の状態を判定できること、
- ・知識として整理しやすい形を出力すること、

が重要な事項となる。これらを満足する手法を持つことによって、加工機械が自らの状態を監視し、加工条件を自動的に修正し、その結果学習機能を有することが可能となる。

センサ情報によって加工状態を特にインプロセスで認識しようとする試みは従来から多くの研究者によって行われてきている。

AE (Acoustic Emission) 信号の情報をを用いてインプロセスで加工状態を認識する研究がある。北野ら[91]は、AE信号による断続切削時の初期欠損の検出について、切削中に発生する全AE信号を計測し、係数率や振幅分布のパターンが工具刃先の欠損状態によって変化する様子を調べた。この結果、これらのパターンより工

具刃先の欠損状態を十分検出できることを示している。森脇ら[92]は、セラミックを主体としたコーティングを施した工具から検出されるAE信号を用いて、工具の寿命を推定した結果について述べている。この工具は、摩耗にともない検出されるAE信号に特徴ある変化が観察される点に着目し、工具摩耗とAE信号の関係を明らかにし、さらにニューラルネットワークを用いることで工具の摩耗状態が推定できることを示している。また、稲崎ら[49]は、フライス加工におけるびびり振動や工具摩耗、さらに切れ刃の欠損の検知を行なうため、AE信号を用いる手法を提案している。この研究では、AEセンサによって複数の加工状態を検出することが可能であることを示している。しかしながら、和田ら[93, 94]は、摩擦・摩耗現象のインプロセス計測に関して述べている。摩耗形態とAE信号の関係を調べるために、相手摩擦面の仕上げ状態を変えることによって、アブレイブ摩耗と凝着摩耗が主として生じる実験を行ない、摩耗の形態とAE信号の間波数スペクトラムに非常に相関があること、さらに、摩耗を伴わない摩擦では低周波成分のAE信号であることを述べている。この研究は切削過程を扱っているのではなく、ジャーナル軸受の焼き付き過程を取り扱っている。実際の加工システムの中では、切削過程の他に摩擦現象をとまなう部分は多く存在し、得られた信号の中から、切削過程に関する摩擦・摩耗現象に対応する部分を取り出すこと、もっと根本的に摩耗現象とAE信号との物理的相関関係については今後の研究を待つ必要がある。また本論文で述べているシステムのように、センサ情報は加工状態を検知あるいは予知を行なうためだけでなく、加工機械の制御量を決定するためにも利用されるべきであり、そのような観点をも考慮すると現在のところ、センサ情報の定量的意味と物理現象の関係が明確である力センサを用いる方が有利であると考えられる。

一方力センサを用いて加工状態をインプロセスで監視する研究も多く行なわれている。樫村[95]は、送り制御下において切削分力比率(背分力/主分力)による逃げ面摩耗の検出・判定方式を検討し、摩耗判定基準を切り込みと逃げ面摩耗幅の関数として表した。この手法によって切削中の切削分力比率の値から逃げ面摩耗幅を推定できると述べている。

太田ら[40]は、切削状態の変化を忠実に表すと考えられる切削力を選び、旋削加工に対して背分力と主分力の相関から異常状態の発生を検知できるかどうか、またFFT解析による方法の有効性はどうかなどについて議論している。旋削加工について、びびり振動が発生した場合には、その初期段階から相関係数が0.5以上の値を示し、これが切削条件に依存しない点で有効であるとしている。

池尾ら[96]は、切削力波形を検出し競合学習ネットワークを用いた工具欠損の検出手法を提案している。

従来よりびびり振動については、その発生機構やその挙動、あるいはその防止方法については多くの研究が行われてきたにもかかわらず、その検知について特に実時間性を考慮したものの報告は非常に少ない。特にエンドミルのように切削機構が複雑なものについてはあまり報告された例がない。工具摩耗のようにある程度統計的にその発生を予測できる現象とは違い、びびり振動は工具や工作物の剛性や形状などにより発生する条件も非常に複雑である。したがって、自動化システムを構築する上で、びびり振動の発生をインプロセスかつ実時間で検知して、工作物に対する影響が問題となる前に抑制する機能を付加することは、非常に重要で意義も大きい。

4.2 カベクトルの軌跡

図 4.1、図 4.2 はスクエアエンドミルにより溝切削した場合の x 軸方向の切削力で、それぞれ正常切削時とびびり発生時のものである。

力センサからの力データをグラフ化して加工状態を判定する場合、我々人間はこれらのグラフを見れば目視により比較的簡単に両者の違いを認識することができる。しかしながら、コンピュータ上でグラフの特徴を抽出することは、例えばニューラルネットワークを用いたパターン認識を適用する考えもあるが、一般に比較的困難でありまた多くの計算時間を要する。

一般にエンドミルのびびり振動を判定する場合、FFTを用いた周波数分析が有用であり非常に多く適用される[97]。図 4.3、図 4.4 はそれぞれ、図 4.1、図 4.2 を FFT 解析した結果である。

この解析結果を観察すると、びびりが発生した場合は約 900 Hz 付近にピークが存在することが分かり、びびり発生のために生じた切削力の高周波成分の存在を認識することができる。そこでこのピーク値に着目して、ある閾値を設定することによって、びびりが発生したどうかを検知する手法が考えられる。例えば旋削などのように、切削力に周期性を持たない加工を対象とする場合は、非常に有効な手段とも考えられる。

しかしながらフライスやエンドミルのような回転工具では、主軸回転と切れ刃の数にしたがって切削力が周期的に変動する。そのため FFT 解析を行なうと、振動成分を示すピークのほかにエンドミルの回転にともなう周波数成分およびその倍数成分などが現われるため、これらとの区別を行なうことが困難である。

またいずれにしても FFT 解析を実行するためには、2 kHz で力データを測定した場合、12 bit による計算で約 1 秒分の力データを必要とし、それからさらに計算時間を必要とすることを考えると実時間性にも乏しい。したがってフライスやエンドミルなどを対象とする場合、FFT 解析は異常加工の検知、予知に必要とされる実時間システムには適当とは言えない。

そこで、カベクトルの軌跡というものを提案する[98, 99]。カベクトルの軌跡とは、

『力センサから検出される時間を媒介変数とした力データを 1 次元または多次元空間上にプロットすることによって描かれる図形』

をさす。

理論的には次のように説明できる。

直交座標系におけるエンドミルの切削抵抗分力、 F_x 、 F_y 、 F_z のうち F_x と F_y の2力に着目する。ここでは簡単のため、切れ刃の刃面の法線が半径と垂直で、 F_x と F_y の合成抵抗 F_{xy} はこの刃面に垂直な方向を向くと仮定し工具の送り方向を y 軸正方向とする。この場合、回転角度 ϕ の関数として F_x 、 F_y は

$$F_x = C_t \cdot \sin^2 \phi \quad (4.1)$$

$$F_y = C_t \cdot \sin \phi \cos \phi \quad (4.2)$$

となる。ここで、 C_t は比例定数である。これをまとめると、

$$F_x - \frac{1}{2}C_t = -\frac{1}{2}C_t \cos 2\phi \quad (4.3)$$

$$F_y = \frac{1}{2}C_t \sin 2\phi \quad (4.4)$$

となる。この式において ϕ を媒介変数と考え、 F_x と F_y の関係を考えると

$$(F_x - \frac{1}{2}C_t)^2 + F_y^2 = (\frac{1}{2}C_t)^2 = \text{const.} \quad (4.5)$$

となる。これを横軸に F_x 、縦軸に F_y をとった座標平面で考えると、中心 $(\frac{1}{2}C_t, 0)$ 、半径 $\frac{1}{2}C_t$ の円を描くことになる。

図4.5にスクエアエンドミルによる溝加工における力ベクトルの軌跡を示す。これは加工機械の主軸と垂直な平面内の力データを時間を媒介変数として描いた2次元力ベクトルの軌跡を表している。横軸は x 方向の力、縦軸は y 方向の力である。

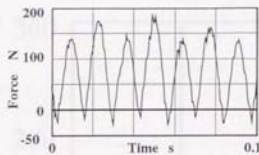


図 4.1 正常時の切削力

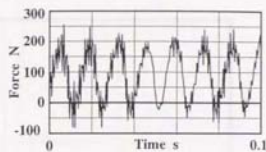


図 4.2 びびり発生時の切削力

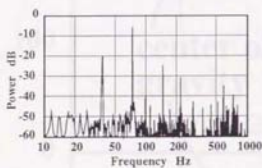


図 4.3 正常時の切削力の FFT

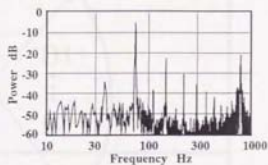


図 4.4 びびり発生時の切削力の FFT

表 4.1 実験条件

工具	スクエアエンドミル $\phi 5$ ねじれ角 30° , 2枚刃, $\phi 5$		
工作物	S45C	送り速度	60mm/min
主軸回転数	2000 rpm	切削深さ	2.5mm
切削形式	溝切削	測定周波数	2kHz
切削油	無し	送り方向	y 軸正方向

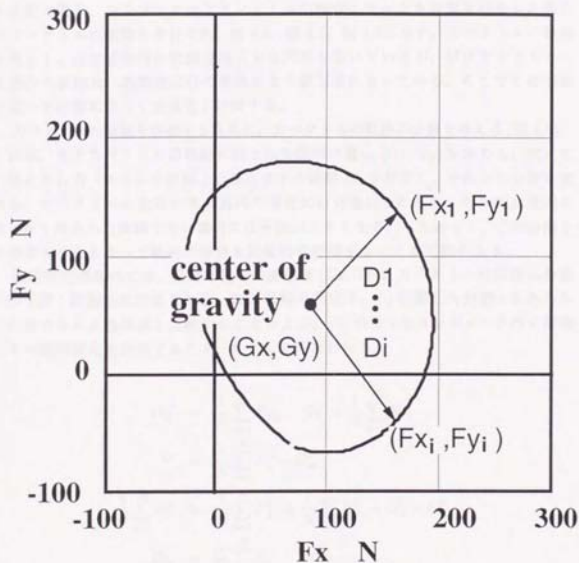


図 4.5 カベクトルの軌跡の定義

4.3 カベクトルの軌跡を用いた加工状態判定法

4.3.1 エンドミル加工のびびり振動の実時間判定

スクエアエンドミルを用いて溝切削を行ない正常切削の場合、びびりをともなった切削の場合、およびスクエアエンドミルの物理モデルより計算を行なった場合のカベクトルの軌跡をそれぞれ、図4.6、図4.7、図4.8に示す。カベクトルの軌跡を見ると、正常切削時の軌跡は滑らかな円形を描いているが、びびりをともなった場合の軌跡は、高調波成分の重畳により鋸刃状になっている。そこでこの形状の違いを計算によって定量化し評価する。

カベクトルの軌跡を評価するために、カベクトルの軌跡の分散を考える(図4.5)。これは、まずカベクトルの軌跡に囲まれた図形の重心(G_x, G_y)を求める。次にこの重心からカベクトルの軌跡上の各点までの距離 D_i を計算し、それらの分散を求める。カベクトルの軌跡の形が真円の場合には分散は0になり、その形が楕円になったり滑らかな曲線でない場合には分散が大きくなる。したがって、この分散を計算することによって軌跡の形状を定量的に評価することが可能になる。

実時間制御器内では、軌跡の重心の座標値(G_x, G_y)、カベクトルの軌跡の分散 V が工具1回転毎に計算される。加工状態の判定は、(i)計算した分散 V をあらかじめ決められた基準値と比較することおよび、(ii)分散 V をコンピュータ内に蓄積しその経時変化を評価すること、によって行なわれる。

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{X_i}, & G_y &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Y_i} \\ V &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2 - D_m^2 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{X_i}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Y_i}^2 - G_x^2 - G_y^2 \\ D_m &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \end{aligned}$$

図4.9、図4.10に正常切削時およびびびりをともなった切削のカベクトルの軌跡の分散値の経時変化を示す。図中の点線は物理モデルにより計算した分散値を表している。正常切削のカベクトルの軌跡の分散値は物理モデルの場合の分散値に近い値を示しているのに対して、びびりを伴った場合には大きな値を示すとともに、分散値が時間軸に対して大きく変動している様子がわかる。これよりびびりが発生しているかどうかを定量的に判定することが可能であることがわかる。

びり発生時にうなりをともなっている場合とうなりをともなっていない場合の2つの状態の違いを判定することも可能である。うなりをともなった場合にはびり振動の振幅が周期的に変動するが、変動周期が工具回転周期と異なる場合には、変動周期に関する情報は力ベクトルの軌跡に関するパラメータの計算によって失われない。そのため、力ベクトルの軌跡の分散の経時変化を観察することによってうなりを認識できる。具体的には、力ベクトルの軌跡の分散の分散を計算することによって判定することが可能となる。図4.11はうなりをともなわない場合のスクエアエンドミルによる溝切削時の合成切削力で、図4.12はその力ベクトルの軌跡の分散の経時変化である。また図4.13はうなりをともなった場合のスクエアエンドミルの溝切削時の合成切削力で、図4.14はその力ベクトルの軌跡の分散の経時変化である。図4.14において、分散値がうなりの周期に同期して周期的に大きく変動している様子が観察できる。力ベクトルの軌跡の分散値の時間領域における分散を考えると、分散の分散値の大小がうなりの程度を表すことになる。

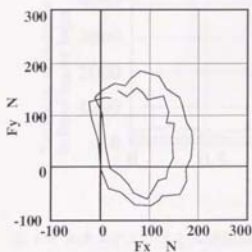


図 4.6 正常切削の力ベクトルの軌跡

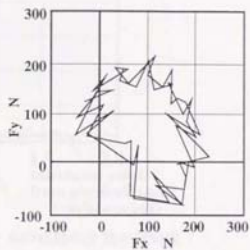


図 4.7 びびりを伴った切削の力ベクトルの軌跡

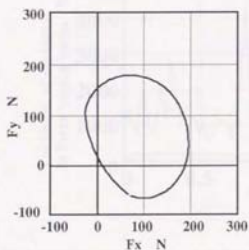


図 4.8 物理モデルによる力ベクトルの軌跡

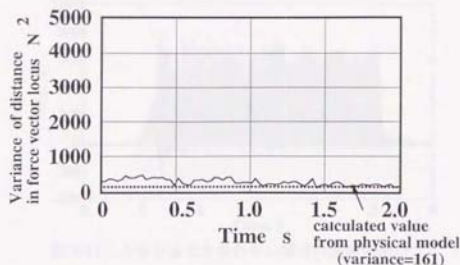


図 4.9 スクエアエンドミル切削の力ベクトルの軌跡の分散の経時変化 (正常切削)

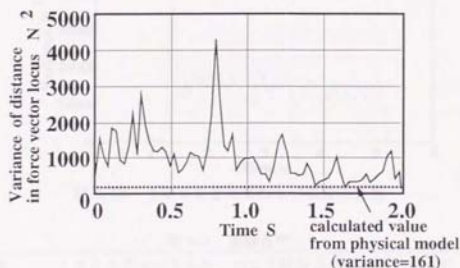


図 4.10 スクエアエンドミル切削の力ベクトルの軌跡の分散の経時変化 (びびり切削)

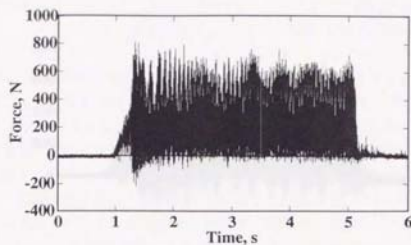


図 4.11 うなりをともなわない場合の合成切削力

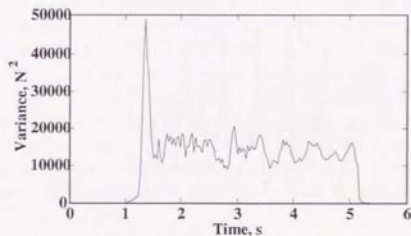


図 4.12 うなりをともなわない場合の分散

表 4.2 実験条件

工具	: スクエアエンドミル、 $\phi 15$, 2枚刃 工作物	: A2017
主軸回転数	: 5000rpm	送り速度 : 60mm/min
切削形式	: 溝切削	切削深さ : 22.5mm
切削油	: 使用	測定周波数 : 5000Hz

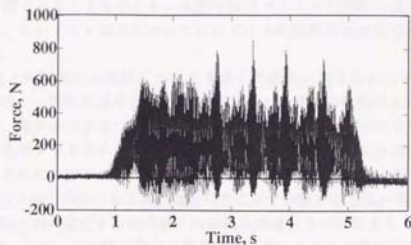


図 4.13 うなりをともなった場合の合成切削力

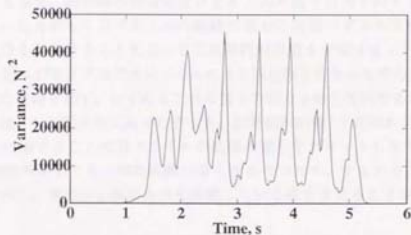


図 4.14 うなりをともなった場合の分散

表 4.3 実験条件

工具	: スクエアエンドミル、 $\phi 15$, 2 枚刃	工作物	: A2017
主軸回転数	: 5000rpm	送り速度	: 60mm/min
切削形式	: 溝切削	切削深さ	: 18.0mm
切削油	: 使用	測定周波数	: 5000Hz

4.3.2 エンドミル加工の摩耗状態の監視

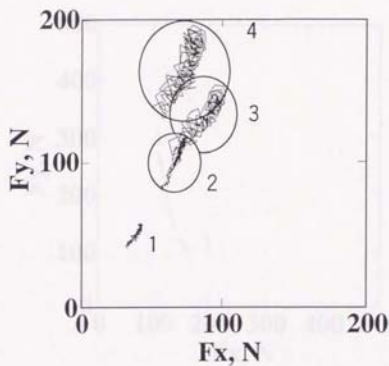
前節では力ベクトルの軌跡の分散に着目することによって、びびり振動の実時間判定が可能であることを示した。本節では力ベクトルの軌跡の重心に着目することにより、エンドミル加工においてエンドミルの摩耗状態の監視の可能性について論じる。

工具摩耗と切削抵抗の関係についても多くの研究が行なわれているが[95, 99, 100, 101, 102]、一般的に逃げ面摩耗が発生すると逃げ面摩耗幅にほぼ比例した増分で主分力、送り分力および背分力が増加する[103]。特に3分力のうち背分力や送り分力が急増することが知られている[104]。エンドミル加工の場合は工具が回転しているために3分力の向きは変化するので、この3分力を時々刻々追うためには検出される3軸方向の力と工具の回転角によって分解する方法が考えられる。この手法では時々刻々変化する切屑厚さの変化を考慮しなければならない。

そこで力ベクトルの軌跡の重心に着目する。力ベクトルの軌跡の重心は工具一回転についての平均切削力を表している。工具一回転の間に作用する背分力ベクトルの和を考えると、溝切削の場合にはおよそ工具の送り方向を向くことが容易に理解できる。したがって力ベクトルの軌跡の重心の位置ベクトルを考えて、その送り方向成分を監視することによって工具摩耗の状態を予測することができる。

図4.15～図4.17にスクエアエンドミルにより溝切削を行なった時の力ベクトルの軌跡の重心の軌跡を示す。いずれも工具の送り方向は y 軸正方向である。各図中の番号の意味は、1が新品の工具でのデータ、以降切削距離(工具切れ刃の回転距離)が約1470mmに達するごとに力ベクトルの軌跡の重心をプロットしたものである。

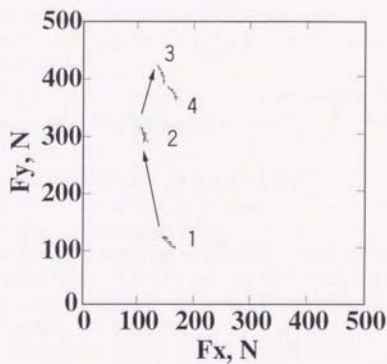
いずれの図においても、切削距離が長くなるにつれて、すなわち工具摩耗が進行するにつれて、重心が y 軸正方向に移動している様子を見ることができる。



実験条件

工具：スクエアエンドミルφ15、2枚刃	
工作物：A2017	
主軸回転数：6000rpm	切削深さ：2mm
送り速度：60mm/min	送り方向：y軸正方向
切削形式：溝切削	切削油使用
備考：1は新品の工具、 以降2、3、4の間の切削距離は約1470mm	

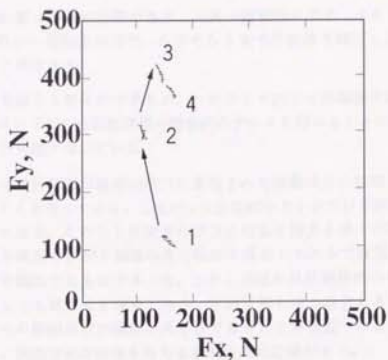
図 4.15 カベクトルの軌跡の重心の切削距離に対する軌跡



実験条件

工具：スクエアエンドミルφ15、2枚刃	
工作物：A2017	
主軸回転数：1500rpm	切削深さ：10mm
送り速度：60mm/min	送り方向：y軸正方向
切削形式：溝切削	切削油使用
備考：1は新品の工具、 以降2、3、4の間の切削距離は約1470mm	

図 4.16 カベクトルの軌跡の重心の切削距離に対する軌跡



実験条件

工具：スクエアエンドミルφ15、2枚刃

工作物：A2017

主軸回転数：1500rpm

切削深さ：10mm

送り速度：60mm/min

送り方向：y軸正方向

切削形式：溝切削

切削油使用

備考：1は新品の工具。

以降2、3、4の間の切削距離は約1470μm

図 4.17 カベクトルの軌跡の重心の切削距離に対する軌跡

4.4 考察

力ベクトルの軌跡に基づく加工状態判定法について考察を行なう。

1. 工具一回転分程度の力データを用いて加工状態を判定できるので、計算に必要な力データを獲得する時間が加工状態を判定するのに十分短い。
2. 示した計算は非常に簡便であり、工具一回転分の力データについて行なった場合、次の一回転分の力データがそろうまでに計算を終了し加工状態を判定することができる。
3. 計算式を追うと明らかであるが、エンドミル加工の周期性に起因する変動成分は、エンドミルの回転周期の整数倍のデータを用いることによって、打ち消すことが可能となっている。
4. 上のことは分散値が静的切削力に重畳された振動成分の振幅の分散値を表していることを言っている。したがって分散値の大小がびびり振動の程度を与えることになる。このことは従来のびびり発生に関する多くの研究と異なる。すなわち従来のびびり理論の多くは系を線形システムで表現し、その安定・不安定を議論するものであった。しかし実際には非線形性の存在により振動が発生しても発散せず減衰したり、定常状態を保つ場合もある。実際の加工では、その振幅がどの程度の大きさであることが重要である。このことを考えると、振動状態の程度を与える本判定法は意義がある。
5. 粗加工の場合と仕上げ加工の場合では要求される加工精度が異なり、許容される振動振幅の大きさも異なる。したがってびびり判定のための閾値を要求される加工精度に応じて設定を変える必要がある。
6. 分散値はびびり振動に関する加工中の状態を表す物理量であるから、加工機械の自律加工において、制御の目的関数にこの状態量を組み込むことによって、びびり振動が発生しない最大の加工効率を実現する制御を行なうことができる。

本章では、多軸力情報に基づいた知能化加工機械が加工に関する知識をどのようにして獲得、整理、そして利用すべきか考える。

加工機械が動作を決定していくためには、主軸回転数や送り速度、切削深さなど加工に関する種々のパラメータを決定する必要がある。決定すべきパラメータとその結果発生する加工状態があるモデルによって関係づけられていれば、その物理モデルを加工に関する知識として保有することで問題は解決する。しかしながら発生する加工状態を的確に予測する物理モデルを記述することは現在のところできていない。

そのため第2章で述べたように、実際に発生した現象をセンサによって獲得し、物理モデルによる予測との偏差を常にモニタリングし、パラメータを修正する必要がある。

多くの場合センサ情報は定量的情報である。そのためセンサ情報がパラメータを定量的に決定するための重要な情報の一つとなる。しかしながら一般にセンサ情報はその情報量が膨大であるという問題がある。そこで加工条件と多軸力情報に基づいた加工結果(加工状態)を実験的安定限界線図の形に整理し利用する方法を提案する。

5.1 加工に関する知識の考え方

従来の加工機械は、人間あるいはコンピュータから入力された動作命令に従って動かされていた。人間である熟練技術者は聴覚、視覚、触覚などの五感を用いて加工状態を把握した。加工後熟練技術者は、製品の状態をまた五感によって評価する。例えば、加工表面を指で触ってみたり、目で光具合を観察して要求されている表面粗さでないかと判断すれば、加工条件を適当に修正してもう一度加工をやり直す。ここで熟練技術者はどのように修正すればよいかは知識としてもっており、その修正量は人によってさまざまである。いわゆるこれが技量と呼ばれるものである。修正するときは、修正する前の加工の状態を五感によって得られた情報としてインプットしてあるので、これを適宜参照しその修正量をだいたい決定している。この修正によって、製品が要求を満たせば熟練技術者は「この加工条件を適用すれば安定な状態で加工が行なえる」ということが分かり、それを経験として蓄積していく。こうして得た経験、知識は同じような状況、すなわち同じ工具、同じ工作物の材質、製品に対する同じ要求であれば、前と同じ加工条件を利用して加工を行う。すなわち加工機械は道具であり、人間がその動作決定を支援することによって、加工機械のもつ機能が生かされる。

センサ情報統合型知能化生産システムの構成要素のうち、(i) マルチセンサ融合

型加工機械、(ii)加工に関する知識、を取り出しこれらが構成するシステムの系を考へてみる。これは従来の加工システムにおける、加工機械・人間系を置き換え、さらに柔軟性を加えて発展させたものにほかならない。マルチセンサ融合型加工機械は、(a)加工機械としての手段、(b)人間の持つ五感の機能、(c)巧みな動作、の実現を担う。(a)は加工機械自身のハードウェアとして実現され、(b)は種々のセンサの搭載によって実現される。そして(c)はマルチセンサ融合型加工機械と結ばれた実時間制御器によって実現される。しかし(c)において制御や監視を行うためには、定性的な規則、定量的な基準が必要である。

本論文の考え方は、コンピュータを援用して単に熟練技術者が蓄積してきた加工に関する知識をデータベース化し、加工のエキスパートシステムを構築していくという従来行なわれてきた考え方に加えて、次のことがもっとも重要であると考えられる。すなわち加工に関する知識を、加工に関する物理モデルと加工機械に搭載した多軸力センサから得られた種々の情報によって構築されるものである、と考える。

加工に関する知識にはさまざまなものがあるが、特に安定な状態で加工を行なうことのできる加工条件に関する知識は、加工条件を決定する上で非常に重要である。現在の段階では加工機械の振動モデル、切削モデルを正確に記述するには至っていないため、モデルだけで対処することは難しい。しかしながら、得られる情報をやみくもに蓄積する方法では情報が膨大になり問題である。そこで、理論的に裏付けられたある程度許容できる物理モデルや関係式に基づいて得られた情報を整理し、膨大な情報を圧縮することにより情報を蓄積する手法を取り入れる。これらの情報を援用する場合、物理モデルや関係式に基づいて検索を行なうことが可能となり、また未知の情報については、物理モデルや関係式により補完することによって予測することが可能となる。そして予測と実際の現象にずれがあった場合には、物理モデルや関係式を修正することにより、学習機能を得ることが出来る。

まず安定な状態で加工を行なうことのできる加工条件に関する情報の蓄積に安定限界線図を用いることを提案する。すなわち、主軸回転速度と主軸方向の切削深さをパラメータとして加工状態を整理する。このように整理することにより、MerrittやThustyらの研究により理論的には、安定と不安定の境界がよく知られている形になることがわかっているから、整理した情報からこの境界を近似的に求めることができ、この境界にしたがって安定・不安定を予測することが可能となる。

加工状態は多軸力センサから得られた多軸力情報に実時間加工状態判定法を適用して得られる。多軸力センサは工具あるいは工作物に搭載しており、実際に生じた加工現象をとらえているため、加振実験の結果を利用して得られた安定限界

線図よりも実際の現象をよく表しているという利点がある。しかも実時間加工状態判定法により通常の加工中に適用した加工条件の加工状態を即座に判定できるため、加工中にも知識を獲得することが可能となる。このような機能はちょうど人が加工しながら条件を修正していく過程において、どの送り速度まで大丈夫なのか経験しているのと同じ行動である。

一方、最近の機械部品に対する高機能化、軽量化の要求に対応するため、航空機部品に代表されるように、剛性の低い部品を加工することが非常に増えている。しかしながら剛性が低いためにうまく加工条件を設定しないとびびり振動が発生してしまう。しかしながらこれまでに薄物部品に対する加工について研究された例はほとんどない。そこでまず薄物加工の切削過程を解析する。そしてびびり抑制制御の一つである変速切削法を薄物加工に適用しその効果を検討する。つぎに薄物加工の加工モデルを記述し、明らかにされない部分を実際の加工で得られるセンサ情報により補うという、本論文のアプローチを適用する。

本章で取り上げた二つの例は、マシニング・センタにおける加工を

1. 工作物に比べて工具の剛性が低い場合の加工
2. 工具に比べて工作物の剛性が低い場合の加工

の大きく2つに分類し、それぞれ別の現象としてモデルを記述して知識として適用とするものである。

5.2 実験の安定限界線図に基づく加工に関する知識の整理

5.2.1 びり振動に関連する従来の研究

加工機械性能の向上に関しては、加工能率と加工精度の向上が要求される。特に加工能率を向上させるためには、切削速度を上昇させて切り込み深さを増加させる方法が考えられるが、これによって強制振動および自励振動が発生するという問題がある。強制振動および自励振動が発生すると、加工精度の向上が阻害されるために、このような加工条件は避ける必要がある。

このように加工機械の自励振動に関しては、加工能率と要求される加工精度を実現し、かつ安定な加工条件を選ぶことが非常に重要である。これまでに多くの研究者が自励振動の発生機構について考察を行ない、安定な加工が可能な加工条件の範囲を求める手順も示されてきた。

切削時に生ずる自励振動に関しては、Arnold[105]をはじめ数多くの研究者が取り組み、自励振動発生の原因や発生限界の特性、加工条件との関連などが明らかにされてきている[106]。すなわち、切削時の自励振動の発生は、切削剛性、切削点近傍の機械構造の振動特性、再生効果などを要素として持つ系の安定性の問題に帰着して考え得ること、低速の切削において安定に切削し得る領域の広がる性質が被削材に切り込む工具の速度に切削力が比例するとするいわゆるベントレーション効果や、工具逃げ面と接する被削材の弾塑性特性に基づき速度に比例する減衰力が生じるとする考え方によって説明しうるなどが示されてきている。

これらの研究は主として自励振動の発生限界を明らかにしようとする立場に立ち、発振後有限の振幅で振動が持続する現象の機構を明らかにする観点からの研究は少なく、工具と被削材の干渉に言及したもの、構造の剛性に非線形特性を考えたものなどが見られるに過ぎなかった。さらにこれらは定性的記述にとどまっていること、実際の現象との関連が明確でないことなど、その性質を十分に説明するものではなかった。また低速切削で安定な切削の可能な領域が増大することについてはすでに述べたような考え方による説明が試みられているものの、これらの考え方が現象と関連づけて的確に把握されているとはいえない。

Merrit は、自動制御の安定判別的手法を応用して、安定な切削条件の範囲を求めることを試みた[106]。横軸に主軸回転速度、縦軸に切削剛性と加工機械剛性の比をとり安定領域を示し、これを安定限界線図と呼んだ。Tlustý は、フライスについて、横軸に主軸回転速度、縦軸に切削深さをとった安定限界線図を示した[80]。安定限界線図とは、工具、工作物、加工機械から成る構造系の切削点付近の動特性と、切削過程の動特性とが、ループをなして構成される系を考え、自動制御の手

法によりその伝達関数の安定条件から、安定な加工条件を表すものである。

しかし安定限界線図を実際に適用するときには、

- 1) 機械構造の振動特性が、工具形状や加工条件などによっては一意的には決定できないために、安定限界線図も理論どおりに一意的には決まらない。
- 2) 理論どおりに安定限界線図を得るためには、工作機械の振動特性を測定する必要があるが、かなり難しい。
- 3) 加振実験によって測定した加工機械の振動特性と、切削中に発生する振動特性は必ずしも一致しないため、得られた安定限界線図と実際の現象にずれが生じる

などの問題がある。

加工機械の動特性の同定は、構造の動特性解析に用いられる十分に確立した手法に頼っているのが普通である。Tobias[107]やTlustý[108]は、工具と工作物の間に正弦波状の強制振動を与え、工具と工作物の相対変位を測定することによって、加工機械の動特性を決定している。両者の研究は、切削時の工具の状態とできるだけ同じ状態を実現できる振動システムが必要であると主張している。彼らの測定は、主軸を回転させ工具を切削点に置いて行なわれたものの、実際に切削を行なっていない。これに似た研究がセンタータイプの旋盤において、SadekとKnight[109]によって行なわれ、びびりに対する抵抗の度合を加工機械の構造の周波数応答から評価した。彼らは工作物の重さや支持、加振力の位置といったさまざまなパラメータの周波数応答に対する影響を示した。Kimら[110]は電磁加振器を用いてランダムに加振力を生成し、測定データに対してはARMAモデルを適用した。加振器を使用すると実験装置が複雑になるため多くの研究者は無振動力を与えるという簡単な手法を採用した。Brown[111]は、衝撃試験の簡便さと有効性を示した。Taylor[112]は、さまざまな同定技術の有利な点と不利な点について評価した。

以上の技術はいずれも加工機械が稼働しておらず、送り機構の動作もないまま行なわれている。またほとんどの技術において対象となっている加工は旋削であり切削機構や装置のとりつけの面から考えても比較的簡単な場合を取り扱っている。

びびり振動やとりわけ安定限界を知るための安定限界線図に関する多くの研究は、切削機構を明らかにして理論的に安定限界線図を計算して、実際の現象にどれだけ一致するかというアプローチである。加工機械の性能や加工能率の観点からすれば、安定に切削し得る限界を明らかにしようとする研究には大きな意義があり、振動現象をより深く理解しようとする振動論の観点と、これが有効な防振法の開発、切削中の状態認識法への応用などに意義ある結果を得ることが期待で

きる。しかしながら現在の段階ではまだまだ多くの問題点があり、解明されるには時間を要するようである。

しかしこのように見てくると、安定限界を議論する時には切削点付近の動特性が非常に重要であること、しかも実際に切削を行なっている状態でデータが収集されるべきであること、実際の切削においては許容される振動があつてこのことを考慮した安定限界を議論することが实际的であることが分かる。

本論文の主旨が、実際の現象を実時間で監視してそこから知識を獲得することであり、すでに述べたように実時間で安定か不安定かを判定することが可能になっている。さらに実際の現象と包括的な物理モデルによって工作機械の動作を決定したり、知識を得たりあるいは知識を整理することが本質であると述べてきた。そこで安定限界線図を計算してそれを実際の現象と比較しようとする多くの研究者のアプローチとは逆に、実際の現象から加工状態を獲得して、その知識を整理する手法として安定限界線図の考え方を適用するというアプローチを提案する。

5.2.2 実験方法

実験の様子を図 5.1 に示す。工作機械としてマシニング・センタを使用し、ベッドの上にはフェイルセイフ・テーブル、その上に 6 分力テーブルを搭載している。6 分力テーブルの上に $150 \times 150 \times 40$ の工作物をのせる。工作物には、6 分力テーブルの T 溝に合うように 4 箇所穴をあけて、6 角穴つきボルトによって固定している。

工作物の材質はアルミ合金 (A2017) で、2 枚刃のスクエアエンドミルを用いて y 軸正方向に送り、切削油によるクーラントを行ないながら溝切削を行ない、そのときの力データを 5000 Hz の周波数で測定した。送り速度を 60 mm/min の一定に保ち ($\phi 8$ については 120 mm/min、180 mm/min についても行なった)、主軸回転速度を 6,000 rpm から 500 rpm ずつ段階的に減少させるといった条件の変更方法を取り、これを主軸方向の切削深さを種々に選んで行なった (表 5.1)。送り方向は y 軸正方向とした。

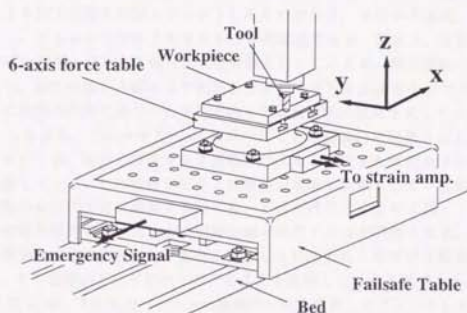


図 5.1 実験の様子

表 5.1 加工条件

工作物	A2017
工具	2枚刃スクエアエンドミル(ハイス)、 $\phi 8, 10, 15$
主軸回転数	500 rpm ~ 6000 rpm (500 rpm 毎)
送り速度	60 mm/min ($\phi 8$ については、60, 120, 180 mm/min の3通り)
送り方向	y 軸正方向
切削形式	溝切削
測定周波数	5 kHz
切削油	使用

5.2.3 実験結果

測定した力データを、高速フーリエ変換(以下FFT)解析および力ベクトルの軌跡の分散値の計算の2通りの手法を用いて処理した。

図5.2は、 x 軸方向の切削力についてFFT解析を行ないその解析結果を見て、主観により加工状態を判定しプロットしたものである。 \times 印が不安定、 \bigcirc 印が安定を表し、どちらかの印がされている点が測定点である。便宜上、安定領域と不安定領域の境界と思われる部分に、境界線を引いてみたが、特別根拠のあるものではない。加工状態を主観により判定したため必ずしも正確なものではないが、明らかに実際の現象に基づいた安定状態と不安定状態の境界を表している。

しかしながら、ThustyやMerrittらが示している理論的に計算された安定限界線図においては、線形の仮定をおき運動方程式あるいはそれに相当する式の安定性を議論している。この場合安定性とは振動が発散も収束もしない状態を意味する。実際の安定不安定を議論する時には、どれだけの大きさの工具・工作物相対変位の振動振幅あるいは加工力の振動振幅が存在するかが問題となる。ここで得られた実験的安定限界線図は、実際に発生した切削力のうちびり振動成分に着目して、その振幅がどれだけのものであるかを評価しているわけである。

一方図5.3は、3次元力ベクトルの軌跡の分散を計算してプロットしたものである。 z 軸は分散値を表しており、 x 軸は主軸回転速度、 y 軸は主軸方向の切削深さを表している。分散値が大きいほど不安定度が高く、図においては山の高さが高いほど不安定であることを視覚的にとらえることができる。プロットしてできたこの曲面をここでは、実験的安定状態曲面と呼ぶことにする。

力ベクトルの軌跡の分散を用いた安定判別では、分散値に対して閾値を設定し、その閾値と比較することにより安定判別を行なう。つまり設定した閾値よりも大きい分散値をとる場合びり振動が発生していると判定する。

このことを図5.3で適用すると次のように考えることができる。

図5.3の各図において設定した閾値を通り xy 平面に平行な平面 α を考える(この平面 α を安定限界平面と呼ぶことにする)。このとき実験的安定状態曲面のうち安定限界平面よりも上に存在する部分に対応する切削条件(主軸回転数と送り速度)は加工状態が不安定である。ここで実験的安定状態曲面と安定限界平面の交線に着目する。そして z 軸の正の方向から交線を見ると安定限界線図に相当する境界線を得ることができる(図5.4)。

FFT解析によって得られた実験的安定限界線図である図5.2と図5.4とを比較するとほぼ同じ安定限界線図であることが分かり、力ベクトルの軌跡を用いた実験的安定限界線図の有効性を確認することができる。

各格子点はそれぞれある1組の切削条件を表現しているが、各格子点は力ベクトルの軌跡の分散値という状態量を持っていることが非常に興味深いことである。この状態量の表す意味は、その格子点が表す条件で切削した場合の安定度を示している。実際の加工においてこの情報を利用する場合、要求される精度あるいは許容される振動によって選択できる加工条件が異なるが、各格子点の状態量がこれを与える。

フーリエ解析の結果から加工状態を判定することは、コンピュータで処理するには非常に難しい上に処理に時間を要する。これに対して力ベクトルの軌跡による加工状態判定法では、分散値の大小によって加工状態を判定することが可能であり、また工具1回転程度の多軸力情報で加工状態を判定できるという利点がある。

したがって、力ベクトルの軌跡による加工状態判定法によって、安定限界線図を獲得し安定な加工条件を自動的に知ることが可能となる。

力ベクトルの軌跡の分散値の大小は、振動状態の程度を表している。仕上げ加工では自励振動が発生しないようにするのは当然のことであるが、荒加工や許容される精度を実現できる場合においては、必ずしも自励振動がない状態である必要はない。Tlustyらの安定限界線図は自励振動が発生するかしないかの境界を与えるものであるのに対し、力ベクトルの軌跡によって得た安定限界線図では、分散の閾値が許容できる振動状態を与えることを意味しているので、状況に応じた加工条件を決定することが出来る。

安定および不安定となる加工条件をデータベース化する場合、個々の条件すべてに対してデータを持つことは、データ量が膨大になり問題があるが、安定限界線図を描き、その境界をなんらかの曲線で近似しておけば、非常に少ないデータ量で、安定な加工条件を得ることが可能となる。そして、もしこの曲線にしたがって決定した加工条件が安定でない場合は、その結果をフィードバックして、境界線の修正を行えばよい。

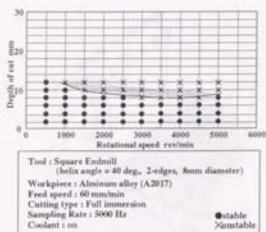
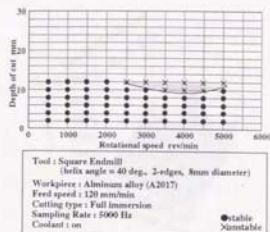
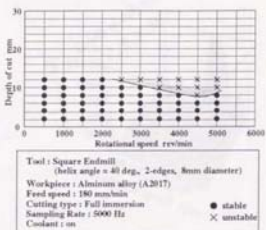
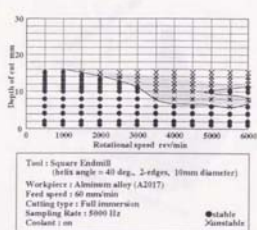
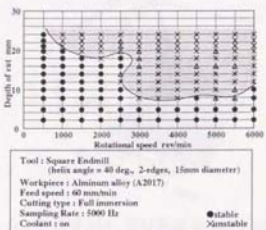
(a) 工具径 $\phi 8$ 送り 60 mm/min(b) 工具径 $\phi 8$ 送り 120 mm/min(c) 工具径 $\phi 8$ 送り 180 mm/min(d) 工具径 $\phi 10$ 送り 60 mm/min(e) 工具径 $\phi 15$ 送り 60 mm/min

図 5.2 FFT による実験的安定限界線図

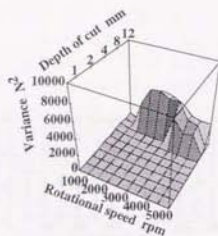
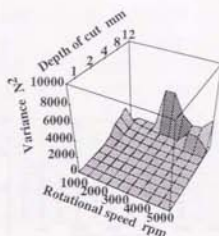
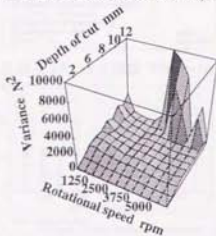
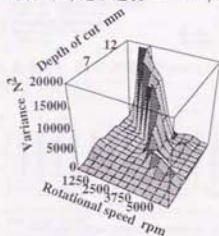
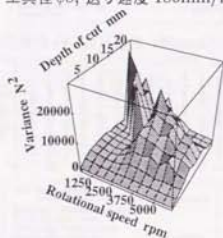
(a) 工具径 $\phi 8$, 送り速度 60mm/min(b) 工具径 $\phi 8$, 送り速度 120mm/min(c) 工具径 $\phi 8$, 送り速度 180mm/min(d) 工具径 $\phi 10$, 送り速度 60mm/min(e) 工具径 $\phi 15$, 送り速度 60mm/min

図 5.3 カベクトルの軌跡による実験的安定状態曲面

図 5.4 カベクトルの軌跡による実験的安定限界線図 (間値 5000 N²)

次にこのようにして得られる実験的安定限界線図は、実験から求められるものであるがゆえに、再現性があるかどうかが問題となる。そこでここでは特に切削深さを広い範囲でとることのできる $\phi 15$ のエンドミルについて実験を行なった。

図 5.3 などを得るための実験で使用したエンドミルをそのまま続けて使用して、同様の切削実験を 2 回、3 回と行なって力データをとって解析を行なった。

図 5.5～図 5.9 が 1 回目の実験に対する FFT 解析による実験的安定限界線図、図 5.10～図 5.15 が 2 回目の実験に対する FFT 解析による実験的安定限界線図、図 5.16～図 5.21 が 3 回目の実験に対する FFT 解析による実験的安定限界線図である。

これらの実験より以下のことが分かる。

1. 3 回目は 2 回目に比べて、切削深さ 16mm 以上において安定領域 (●印) が広がっていることがみられる。この安定領域の広がりは、1 回目に対する 2 回目を見ても認められる。
2. 3 回目は 2 回目に比べて、切削深さ 16mm 以下において安定領域に違いは見られない。
3. 軸別のデータを比較してみると、切削力 (F_x, F_y, F_z) については特性に大きな違いは見られない。しかし FFT 解析の結果では、同じ不安定状態でも軸によってその程度が異なる。例えば、ある条件では F_x の方が激しい振動状態であるが、別の条件では F_y の方が激しい振動状態であるということがある。このことは加工条件によって振動特性の方向が異なってくることを意味している。
4. z 軸まわりの偶力 (トルク) については、切削力とは安定条件がやや異なる。このことは、トルクに関する安定性が工具のねじり振動の安定性により大きく依存するためと考えられる。

切削条件はいずれもまったく同じであるから、これらの違いは工具の摩耗状態に起因すると考えられる。切削深さの小さい部分について状態変化があまり顕著でないのは、すべての実験を同一のエンドミルを使用しているため、エンドミルの切れ刃の先端部程摩耗が速く、工具摩耗は初期摩耗が急激に起こったあと、摩耗状態の変化が緩慢になることが知られており、実験の説明になっている。

経験的には新品の工具はびびりやすいことが知られていて、この実験結果はそのことを表している。

次にこの 3 回の実験について図 5.22～図 5.27 に力ベクトルの軌跡の分散によって描いた安定限界曲面を示す。図 5.22、図 5.24 および図 5.26 は分散値の時間平均

を用いてプロットしたものであり、これに対して図 5.23、図 5.25 および図 5.27 は分散値の最大値を用いてプロットしたものである。また図 5.28～図 5.30 は 1 回目から 3 回目の各安定限界曲面を、5000 N^2 の閾値で切断した時の断面(安定限界線図)である。この結果を FFT 解析の結果と比べると摩耗の影響と考えられる変化も現れていることが確認できる。

分散値の時間平均によって作成した安定限界曲面と分散値の最大値によって作成した安定限界曲面を比べると、加工条件によっては大きく異なっているところがある。図 5.26 と図 5.27 とを比べるとその違いが顕著に現れている。具体的には 3500 rpm より大きい主軸回転数の場合に、最大値によって作成した安定限界曲面は起伏の激しい曲面になっているが、平均値によって作成した安定限界曲面は比較的起伏の変化は小さい曲面となっている。

これは加工条件によってはびり振動が発生している場合でも大きく分けて 2 種類の状態があることが実際の現象から確認される。それはびり振動とともにうなりをとまっている場合とそうでない場合である。うなりをとまっている場合の切削力の経時変化の一例を図 5.32～図 5.34 に、そしてそのときの力ベクトルの軌跡の分散値の経時変化を図 5.31 に示す。うなりを生じている場合力ベクトルの軌跡の分散値は時間軸に対して振動している様子が観察される。力ベクトルの軌跡の分散値の計算では、工具 1 回転あたりの力データについて計算することにより、工具回転の周期の振動成分を除くことができることを説明した。しかしながらうなりが発生すると一般にうなりの周波数と工具回転の周波数は異なるために、図 5.31 のような分散値の振動が計算されたと考えられる。したがって加工状態の安定不安定を議論する場合は、分散値の最大値によって議論することがよいことが分かる。しかしながらこれまでの考察から、分散値の分散を計算することによりうなりの存在を認識することも可能であることがわかる。

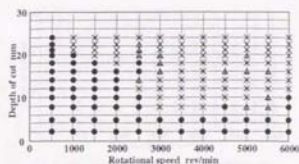


図 5.5 Fx の FFT による実験的安定限界線図 (1 回目)

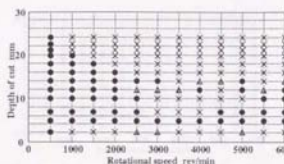


図 5.6 Fy の FFT による実験的安定限界線図 (1 回目)

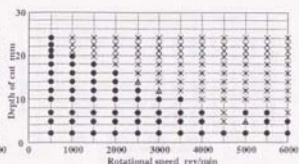


図 5.7 Fz の FFT による実験的安定限界線図 (1 回目)

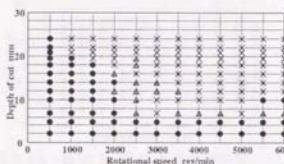


図 5.8 Mz の FFT による実験的安定限界線図 (1 回目)

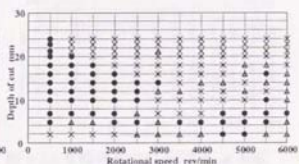


図 5.9 3 軸合成力の FFT による実験的安定限界線図 (1 回目)

表 5.2 実験条件

工具	スクエアエンドミル	ねじれ角 40°, 2 枚刃, $\phi 15$
工作物	アルミ合金 (A2017)	送り速度 60mm/min
切削形式	溝切削	クーラント あり
測定周波数	5000Hz	
●: 安定, ×: 不安定, ▲: どちらともいえない		

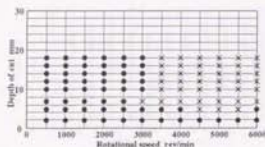


図 5.10 Fx の FFT Analyzer による実験的安定限界線図 (2 回目)

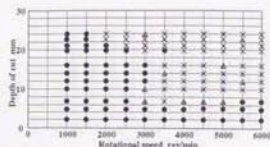


図 5.11 Fx の FFT による実験的安定限界線図 (2 回目)

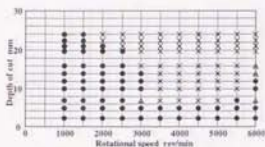


図 5.12 Fy の FFT による実験的安定限界線図 (2 回目)

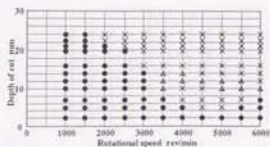


図 5.13 Fz の FFT による実験的安定限界線図 (2 回目)

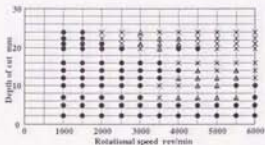


図 5.14 Mz の FFT による実験的安定限界線図 (2 回目)

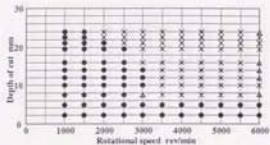


図 5.15 3軸合成力の FFT による実験的安定限界線図 (2 回目)

表 5.3 実験条件

工具	スクエアエンドミル	ねじれ角 40°, 2枚刃, φ15
工作物	アルミ合金 (A2017)	送り速度 60mm/min
切削形式	溝切削	クーラント あり
測定周波数	5000Hz	

●: 安定, ×: 不安定, ▲: どちらともいえない

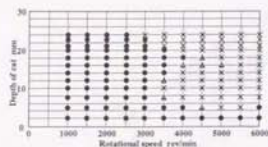


図 5.16 Fx の FFT Analyzer による実験的安定限界線図 (3 回目)

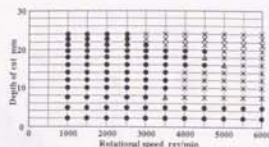


図 5.17 Fx の FFT による実験的安定限界線図 (3 回目)

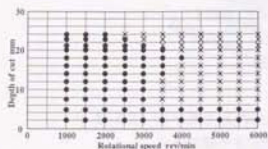


図 5.18 Fy の FFT による実験的安定限界線図 (3 回目)

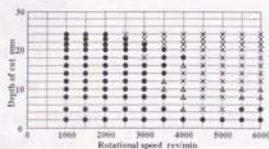


図 5.19 Fz の FFT による実験的安定限界線図 (3 回目)

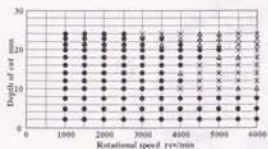


図 5.20 Mz の FFT による実験的安定限界線図 (3 回目)

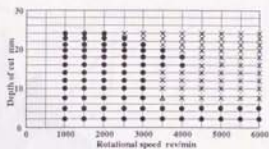


図 5.21 3 軸合成力の FFT による実験的安定限界線図 (3 回目)

表 5.4 実験条件

工具	スクエアエンドミル	ねじれ角 40°, 2 枚刃, φ15
工作物	アルミ合金 (A2017)	送り速度 60mm/min
切削形式	溝切削	クーラント あり
測定周波数	5000Hz	
●: 安定, ×: 不安定, ▲: どちらともいえない		

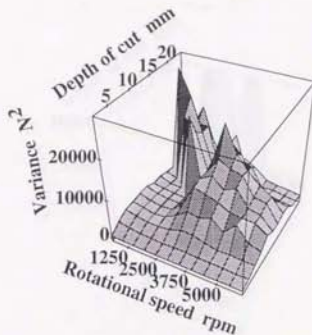


図 5.22 カベクトルの軌跡の分散の平均値による実験的安定限界線図 (1 回目)

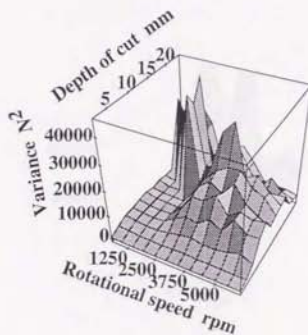


図 5.23 カベクトルの軌跡の分散の最大値による実験的安定限界線図 (1 回目)

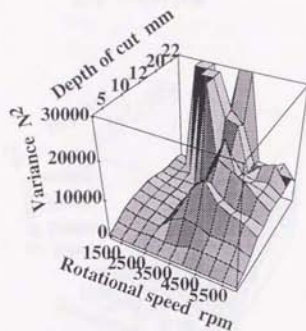


図 5.24 カベクトルの軌跡の分散の平均値による実験の安定限界線図 (2 回目)

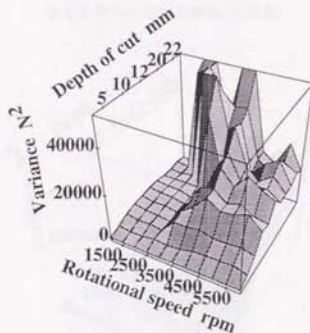


図 5.25 カベクトルの軌跡の分散の最大値による実験の安定限界線図 (2 回目)

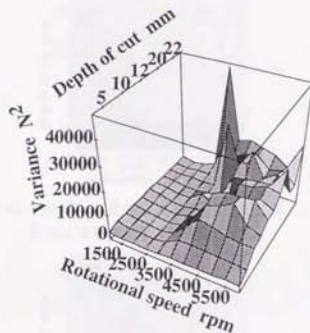


図 5.26 カベクトルの軌跡の分散の平均値による実験の安定限界線図 (3 回目)

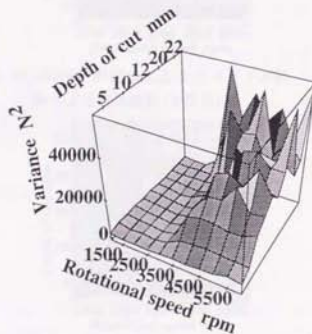


図 5.27 カベクトルの軌跡の分散の最大値による実験の安定限界線図 (3 回目)

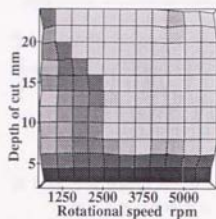


図 5.28 $5000N^2$ の閾値によるカベクトル軌跡による限界線図 (1 回目)

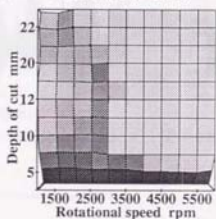


図 5.29 $5000N^2$ の閾値によるカベクトル軌跡による限界線図 (2 回目)

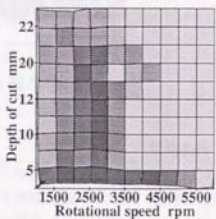


図 5.30 $5000N^2$ の閾値によるカベクトル軌跡による限界線図 (3 回目)

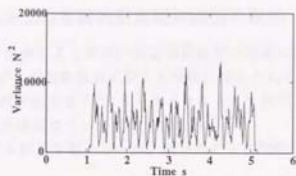


図 5.31 うなり時の力ベクトルの軌
跡の分散の経時変化

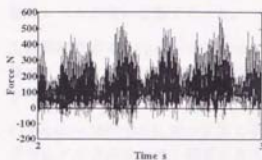


図 5.32 うなり時の x 軸方向の切削力

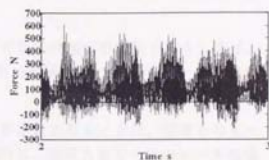


図 5.33 うなり時の y 軸方向の切削力

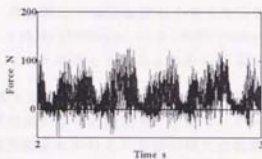


図 5.34 うなり時の z 軸方向の切削力

表 5.5 切削条件

工具径	φ15	ねじれ角	40°
送り速度	60 mm/min	主軸回転数	6000 rpm
切削深さ	18mm		

5.2.4 エンドミル加工の実験的安定限界線図の説明

力ベクトルの軌跡に分散による実験的安定限界線図の獲得においては、振動状態の大小を表しているが、周波数領域に関する情報は捨てられている。そこで $\phi 15$ の切削実験について、実験結果をFFTアナライザによって解析した結果より、獲得された実験的安定限界線図について説明を行なう。

ここに周波数に関する結果を載せないが、以下のことが判明した。

1. 主軸回転数が6000rpm～4500rpmまでで加工状態が不安定であるときは、4kHz～8kHzのあたり(領域Aと呼ぶことにする)の周波数のピークが観察される。この場合に特定の周波数のレベルだけが低いのではなく、複数の周波数のレベルが高い状態であった。
2. 主軸回転数が4500rpm～4000rpmにおいて加工状態が不安定であるときは、領域Aに加えて、1kHz周辺の領域(領域Bと呼ぶことにする)のピークが観察される。
3. 4000rpm～3000rpmにおいて加工状態が不安定であるときは、領域Bのピークのレベルが非常に高く顕著になると同時に、領域Aのピークのレベルは低くなり、3000rpmにおいては領域Aのピークはほとんど観察されない。
4. 主軸回転数が6000rpm～4500rpmまでの周波数変化を観察すると、支配的な周波数は主軸回転数が小さくなるにしたがって小さくなる傾向が見られる(4.4kHz(5500rpm)→4.15kHz(5000rpm))が、あるところで別の高い周波数のピークが高くなることがある(5.25 kHz(4500rpm)→4.55kHz(4000rpm))。

特定的主軸回転数に対して多くの支配的な周波数成分が存在することは、加工機械の系が多くの振動モードをもっているためと考えられる。そのため実験的安定限界線図における不安定領域には複数の安定限界線図が重なり合っていると考えられる。そのことは、支配的な振動成分の周波数が主軸回転数が小さくなるにつれて同様に小さくならず、あるところで別の高い周波数成分が現れることより推測される。

したがって、力ベクトルの軌跡の分散によって獲得された実験的安定限界線図によって描かれる不安定領域は、複数の振動モードによって構成される複数の安定限界線図によって描かれる不安定領域の論理和に相当すると考えられる。これは、複数の安定限界線図の包絡線を表していると考えて良い。すなわち実験的安定限界線図は、安定限界線図の理論[107]における無条件安定の境界 $h_m(N)$ に相当するものと考えられる。

[107]によると、実験的安定限界線図は切り込み速度係数 $K > 0$ の場合に相当する。すなわち主軸回転数の低い領域で安定して切削できる切削深さが大きくとれる場合に相当する。この場合には工具摩耗(逃げ面摩耗)は、切り込み送り速度係数 K を大きくする効果がある。このとき、無条件安定の境界 $h_m(N)$ は主軸回転数の高い方へ移動することが、線形理論の計算により確認できる。したがって実験的安定限界線図の同様の移動現象は、工具摩耗によって起こっているといえる。

5.3 薄物部品の加工

5.3.1 従来の研究

航空機部品に代表される薄物部品の加工では、工作物の剛性が低いためにびびり振動が発生しやすい。びびり振動を避ける加工条件の設定は工作物の形状に依存するという難しさがあるため、現場のオペレータが加工状態を監視しながら加工条件を修正しているのが現状である。またびびり振動がなるべく発生しないように、防振用の治具を製作し取り付けている。治具による防振は、形状によってどこを押えるかということと、いかにして治具を設計するかという問題があり、非常に難しい。びびり振動に関しては形状によって発生する条件がさまざまであり、振動を避けるための条件をあらかじめ決定することが非常に難しい。

しかしながら、これまでに薄物部品の加工について研究された例はほとんどと見当たらない[47, 113]。[113]で佐藤は、薄物部品の加工における自動振動には非線形型の挙動が含まれることを指摘し、モデル解析の結果を用いて吸振器の設計を行なうことにより、大きな防振効果を得たという報告がなされている。[47]では、びびり抑制システムを開発してその加工例として薄板材の工作物をボールエンドミルにより加工することを行なっている。このびびり抑制システムは、工具・工作物の相対振動を検出し、それをFFTアナライザにより解析して相対振動の大きさおよび相対振動の周波数を計算し、その値が閾値を越えたかどうかでびびりの検知を行なっている。制御は主軸回転数を微小変更するという手法をとっている。このシステムでは計算時間には約1秒ほどかかるほか、実験状況が明確にされていない。

薄物部品の加工において、自動振動が発生しないような加工条件の決定方法、あるいは制御手法の見地から研究された例はこれまでにない。薄物部品の加工が他の部品の加工と大きく異なる点は、

- 1) 工作物の剛性が加工系の中できわだって低いこと、
- 2) 加工中の形状の変化によって剛性が変化すること、
- 3) 加工部位によっても剛性が変化すること

である[114]。安定限界線図は、加工中の振動特性は一定であるとして描かれたものであり、上記のような特性をもつ加工に対して適用するのは難しい。そこで振動特性が時間に対して変化するモデルを記述し、その安定性を議論することが必要である。

今後ますます要求される薄物部品の加工に対しても、現象を解明してその結果を加工の知識としてもち、本論文で提案しているシステムを適用することにより

自動的に精度よく加工できることは、本システムの有効性を示す上で重要な例となり、また社会的意義も大きい。

5.3.2 実験方法

実験で使用した工作物の形状および寸法を図 5.35 に示す。図において工作物の両端にある穴において 6 角穴付ボルトによって 6 分力テーブルに固定した (図 5.38)。薄肉部の下側は 6 分力テーブルの面から離れていて完全に自由になっている。すなわち簡単には両端固定の梁のモデルとして考えることができる。工作物の製作にあたっては、ワイヤカットを使用した。この理由は、薄肉部を有するために製作中にできるだけ力が加わらないようにする必要があること、刃物で加工を行なった場合、それによって加工面に加工痕やうねりなどが残り、それが実験中のびびり振動に影響を与える可能性があると考えたからである。

工具はスクエアエンドミルを使用した。工具径は $\phi 15$ 、刃長は 40 mm、ねじれ角 40° 、すくい角 20° 、切れ刃の数は 2 枚である。

工具と工作物との位置関係および工具の送り方向を図 5.37 に示す。主軸回転数や送り速度は各実験によって異なるが、工作物の取り付けや工具の送り方向などはすべての実験において図 5.37 に示すように行なった。

切削力は 6 分力テーブルからの垂出力を実時間制御器によって 5000 Hz の測定周波数によって測定したものを、力に変換することによって得た。



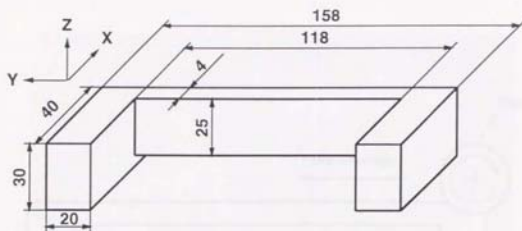


図 5.35 薄物加工実験に使用した工作物の寸法

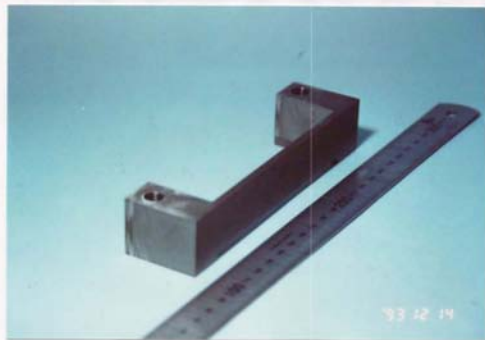


図 5.36 薄物加工実験に使用した工作物

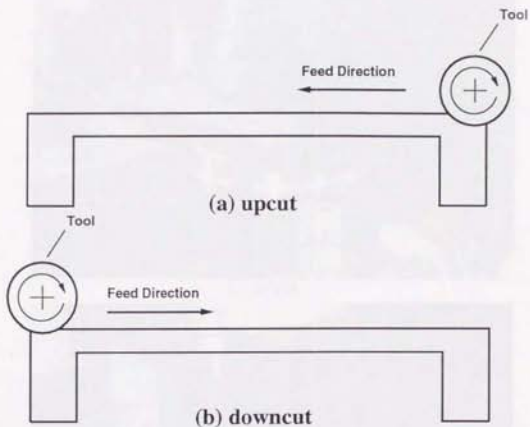
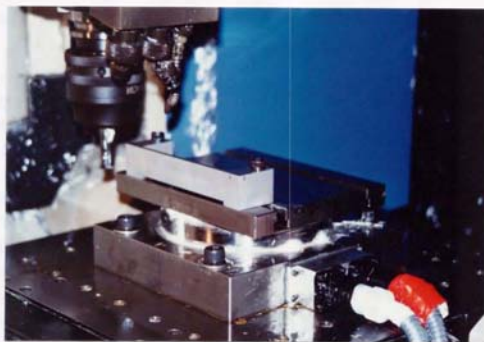


図 5.37 工作物と工具の送り方向の関係

表 5.6 薄物加工実験に使用した工具の仕様

工具径	: $\phi 15$	刃長	: 40
ねじれ角	: 40°	すくい角	: 20°
切れ刃の数	: 2		



(a) 加工前



(b) 加工中

図 5.38 薄物加工の実験の様子

5.3.3 薄物加工の切削過程

加工実験とその結果

まず用意した工作物を実際に加工することによってどのような問題、現象が発生するかを観察する。

主軸回転数 2012 rpm、送り速度 100 mm/min の条件で薄肉部の厚さ 4mm の工作物を切削幅 1mm で切削した。加工後の工作物を図 5.39 に、切削中の 6 軸力のデータを図 5.40 に示す。

図 5.40 において 10.5 秒後から 107.5 秒後までの間切削を行っており、そのうち薄肉部を切削しているのは、22.5 秒後から 95.5 秒後までである。

x 軸方向の切削力を観察すると、30.8 秒後までは、正常に切削が行われていた。切削力の振幅は約 80Np-p (peak to peak) である。その後急激に切削力が増大し大きな振動が始まっていることが分かる。このときの切削力の振幅は最大で 400Np-p である。その後 39.5 秒後より振動がやや穏やかになり切削力の振幅は約 200Np-p である。47.5 秒後より y 軸方向の切削力が振動し始め、この不安定状態は 75 秒後あたりまで続いている。そのあと 75 秒後あたりから再び x 軸方向の切削力が不安定になり大きな振幅で振動を始め、その振幅は 82.5 秒後に 1200Np-p で最大となっている。

次に切削状態が変化しているところを目安にデータをサンプルしてフーリエ解析を x 軸方向および y 軸方向の切削力について 12bit サンプル (4096 個のデータ数で約 1 秒分のデータ) で行なった (図 5.41、図 5.42)。

最初に激しい振動が発生する 31 秒後の切削力についての解析結果を見ると、振動周波数は x 軸方向も y 軸方向も 1326Hz であることが分かる。40 秒後のやや穏やかな振動状態における振動周波数は x 軸方向については、1341Hz あるいは 1409Hz であるが、このとき y 軸方向については 1644Hz の振動周波数が顕著に観察される。y 軸方向の切削力の振動が支配的である 50 秒後での結果を見ると、x 軸方向、y 軸方向ともに振動周波数は 1609Hz である。そして最後に再び x 軸方向の切削力の振動が支配的である 82 秒後の振動周波数は 1208Hz となっている。

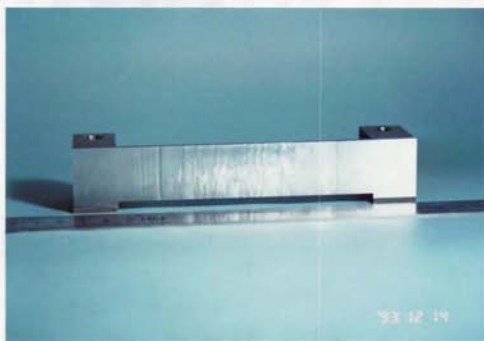
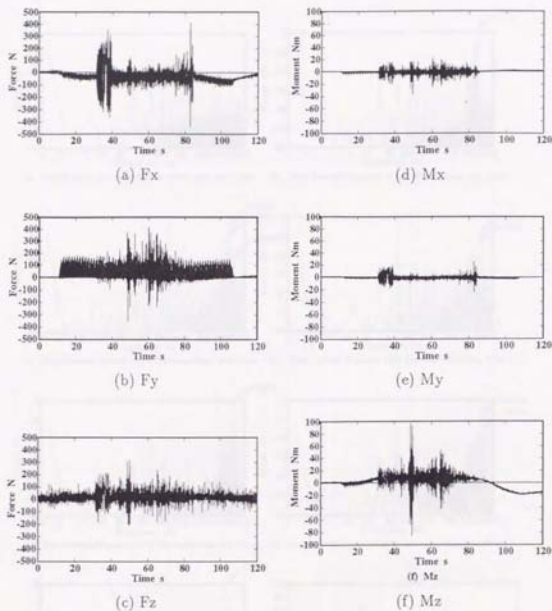


図 5.39 切削条件一定で加工した工作物



実験条件

工具	: スクエアエンドミル, $\phi 15$, 2 枚刃	送り速度	: 100 mm/min
工作物材質	: A2017(アルミ合金)	主軸回転数	: 2012 rpm
切削幅	: 1 mm	薄肉部の高さ	: 25 mm
切削形式	: アップカット	測定周波数	: 5000 Hz

図 5.40 切削条件一定による薄物加工の切削力データ

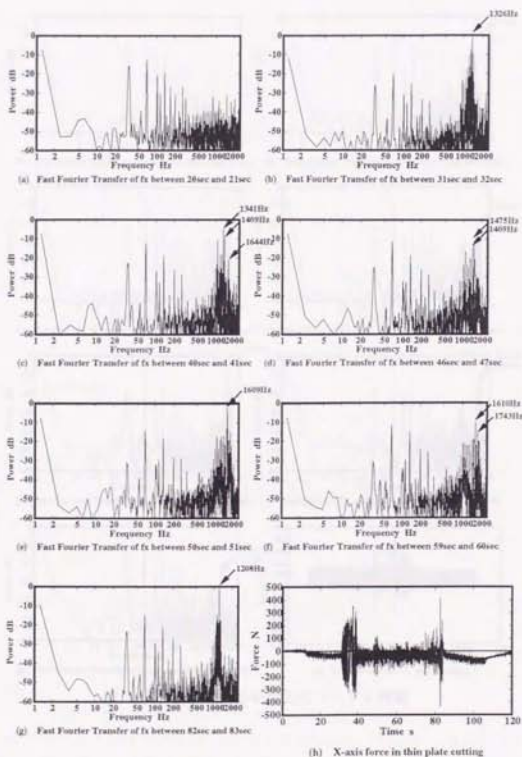


図 5.41 x 軸方向の切削力のフーリエ解析結果

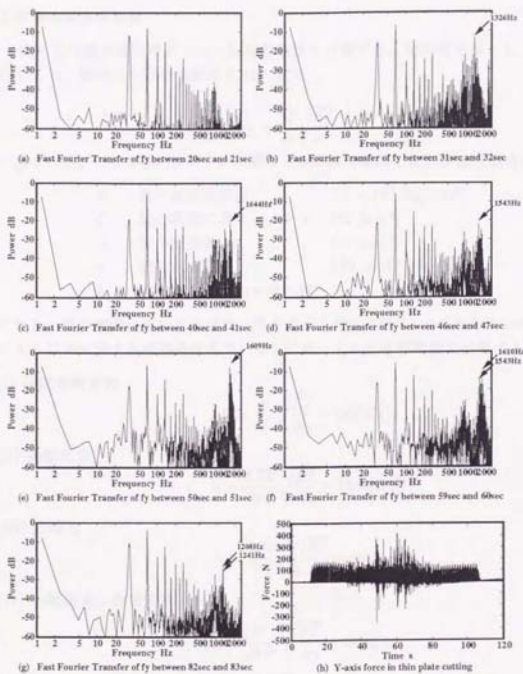


図 5.42 y 軸方向の切削力のフーリエ解析

工作物の固有振動数

次に工作物の薄肉部について固有振動数を計算する。薄肉部を梁としてモデル化すると、薄肉部の固有振動数 f_n は一般に

$$f_n = \frac{k_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{A\gamma}} \quad (5.1)$$

で表される。ここで各パラメータの意味と本実験で使用了工作物の場合の値は、

E : 梁の縦弾性係数	7.4×10^3 [kg/mm ²]
I : 梁の断面二次モーメント	133 [mm ⁴]
A : 梁の断面積	100 [mm ²]
γ : 梁の密度	2.79×10^{-6} [kg/mm ³]
k_n : 振動数方程式の n 次の解	

である。梁の縦弾性係数や密度は、高力アルミ合金2種T4のものをを用いた。これにより以下に示す各境界条件について1次モードの固有振動数を計算すると、

(i) 両端単純支持

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\gamma}} = 663[\text{Hz}]$$

(ii) 両端固定

$$f_1 = \frac{4.73^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\gamma}} = 1504[\text{Hz}]$$

(iii) 片持ち

$$f_1 = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\gamma}} = 40[\text{Hz}]$$

(iv) 一端固定、他端支持

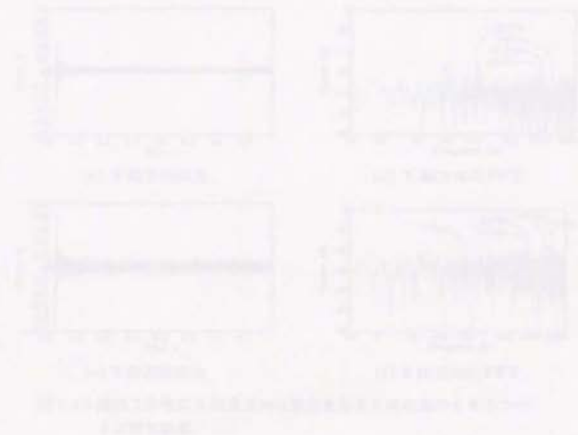
$$f_1 = \frac{3.927^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\gamma}} = 1036[\text{Hz}]$$

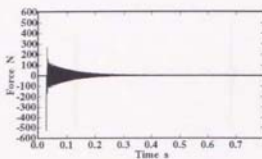
となる。

一方実験で使用了工作物の中央において x 軸負の方向 (梁に垂直な方向) に撃力を与えることによって得られる3軸力を測定して、それをFFT解析した結果を図5.43に示す。 x 軸方向の切削力のFFTの結果を見ると、1407 [Hz] のピークが見られる。この振動数は、図5.41の40秒後の解析結果の振動周波数にほぼ等しいことが分かる。図5.43の結果は工作物の振動を6分力テーブルを介して測定したことになる。

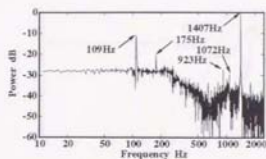
6分力テーブルに対して、 x 軸負の方向に撃力を与えてそのときの3軸方向の力とFFT解析したものを図5.44に示す。さらに工作物の純粋な固有振動数を測定するために、図5.45に示すように工作物に歪ゲージを4枚貼り付けて、梁の中央において x 軸負の方向に撃力を加えて出力を測定した。その結果を図5.46に示す。これらの実験より使用した工作物の固有振動数は1415Hzであり、6分力テーブルの出力でみた場合、1407Hzであることが分かる。

この結果を理論的なモデルの計算結果と比較すると、この工作物をモデルとして考える時は両端固定梁として考えて良いことが分かる。

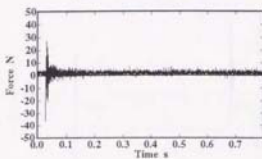




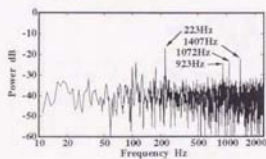
(a) X 軸方向の力



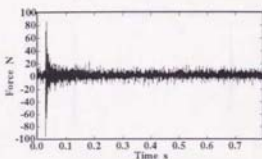
(b) X 軸方向の FFT



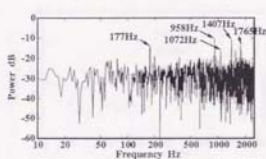
(c) Y 軸方向の力



(d) Y 軸方向の FFT

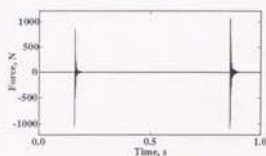


(e) Z 軸方向の力

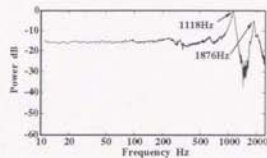


(f) Z 軸方向の FFT

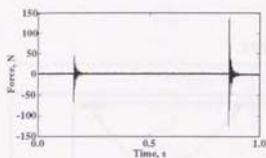
図 5.43 薄物工作物に X 軸負方向に撃力を与えた時の出力とそのフーリエ解析結果



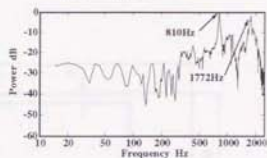
(a) X 軸方向の力



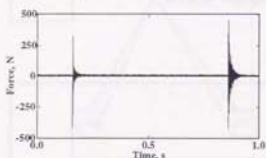
(b) X 軸方向の FFT



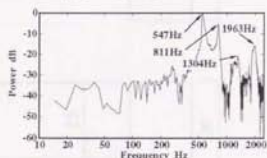
(c) Y 軸方向の力



(d) Y 軸方向の FFT



(e) Z 軸方向の力



(f) Z 軸方向の FFT

図 5.44 6 分力テーブルに X 軸負方向に撃力を与えた時の 3 軸力とそのフーリエ解析結果

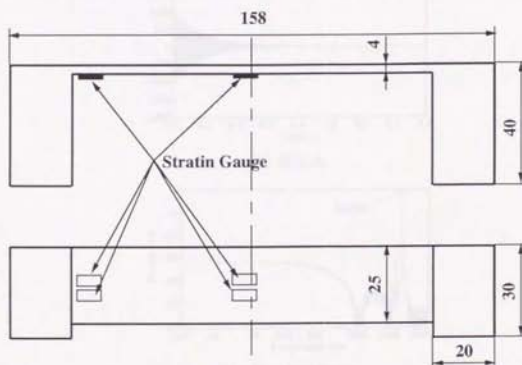
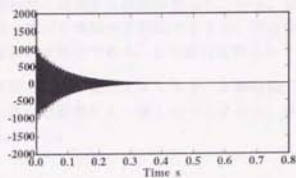
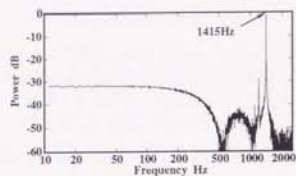


図 5.45 工作物に貼り付けた歪ゲージの様子



(a) 歪出力



(b) 歪出力のFFT

図 5.46 薄物工作物に撃力を与えた時の歪ゲージの出力とそのフーリエ解析結果

考察

以上の実験と解析より以下のことが分かった。

- 薄肉部の切削中、梁の両端付近では全く正常に加工が行なわれているが、ある場所にさしかかると突然切削力の振幅が増大して振動状態に変わる。
- 振動状態の中でも、振動振幅が大きいところ(梁の両端に近い部分)と振動振幅がそれほど大きくないところ(梁の中央部分)が存在する。梁の中央部分ではむしろ梁の縦振動に起因する振動が発生している。梁の両端に近い部分の振動は梁に垂直な方向の振動が支配的であるが、梁の中央部分の振動は梁に平行な方向の振動が支配的である。この理由は明らかではない。
- 振動周波数が時間とともに変化することや、主軸回転の高周波によるものでないこと、梁の固有振動数にも一致しないことから、再生びり振動が発生していると考えられる。

5.3.4 変速切削法による制御

びびり振動の抑制制御を考えるにあたり、びびり抑制手法の一つである変速切削法[115]を薄物加工に適用して抑制効果を検討する。

変速切削法には以下のような一般的性質がある。

- 主軸回転数が一定であれば再生びびりが発生する切削条件においても、主軸回転数を変動させればびびり振動を抑制できる。
- 速度変動率が大きいほど、びびり振動の抑制効果は大きい。
- 速度変動幅が平均回転速度の20%以上であれば、速度変動幅はびびり振動の抑制効果にはほとんど影響しない。
- 一般に切り込みが大きくなると、びびり振動を抑制するには速度変動率を大きくする必要がある。切削速度が大きくなった場合にも同様である。
- 機械構造系の動的剛性が極端に低く、再生びびりが非常に生じやすい場合、変速切削のびびり抑止効果はなく、逆にびびりを激しくする結果となる。したがって変速切削は機械構造系がある程度の動的剛性を備えている場合に、その荒加工能力をさらに向上させたい場合に重要性がある。
- 0.2 mm程度の切り込みで仕上げ加工を行なっても、再生びびりが生じるような中ぐりバーの場合で、中ぐりバーの動的剛性が極端に低くなければ、変速切削によってびびりを抑止することが可能である。しかしその際得られる仕上げ面は通常仕上げ切削加工に要求される精度を達成することは難しい。
- 被駆動系の回転慣性があまり大きくない中ぐり加工や旋盤加工の場合、実用的な速度変動方式としては、周波数が0.5～3 Hz、変動範囲が平均速度の $\pm 10 \sim \pm 20\%$ で三角波状の変動がよい。周波数が3 Hzを越える場合かえって抑制効果は低下する。このような速度変動を行なうためには、主軸駆動系の速度制御系は、時定数が0.3秒あるいはそれ以下の良い応答性が必要である。

以上のような性質を考慮して、ここでは主軸回転速度を三角波上に1 Hzの周期で平均速度の $\pm 20\%$ の変動率により変化させた。これらの実際の速度変化は厳密に三角波にはならないが、ここでは詳しくは議論しない。

図5.48に变速切削法による実験結果を示す。平均主軸回転数は2000 rpm、平均送り速度を100 mm/minで、一刃あたりの送り量が一定となるように、主軸回転数と送り速度を $\pm 20\%$ の変動率、1 Hzの周波数で変化させた。

制御を行なわなかった場合に特徴的であった、切削開始に発生する梁の端(始端)付近での激しいびり振動が回避されていることが分かる。しかしながら、梁の中央付近での y 軸方向の切削力の振動は相変わらず発生し、また梁の終端付近で起こった振動は、今回の実験でも発生している。梁の中央での振動は、梁の下部に振動による跡が観察された(図 5.47)。使用した工具は右ねじれ刃のスクエアエンドミルであり、工具の回転によって切れ刃は梁の下部から切削を開始している。

このように工作物の振動特性が時間とともに変化するため、一定の制御条件では、効果が得られる部分と効果が得られない部分が存在する。そこで次節ではモデルを仮定して振動特性を解析する。



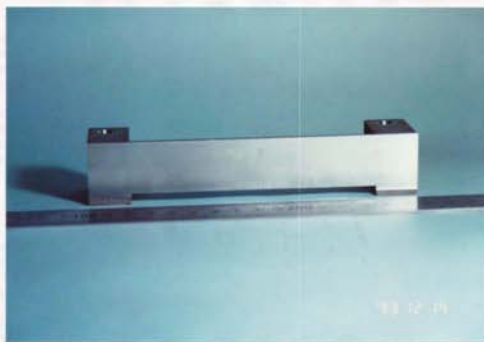
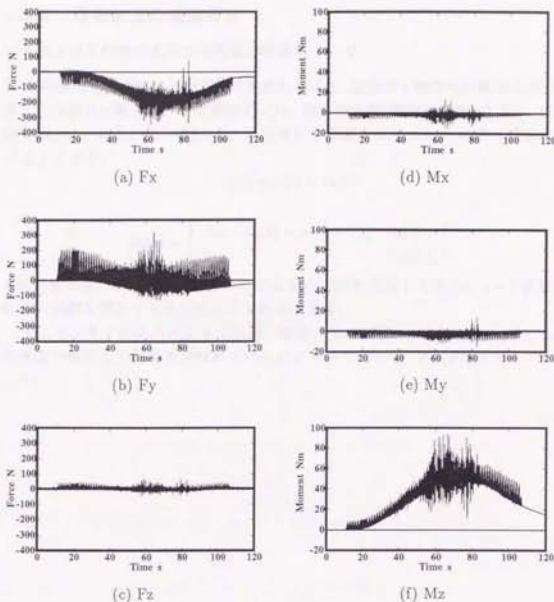


図 5.47 変速切削法で加工した工作物



実験条件

工具	: スクエアエンドミル, $\phi 15$, 2枚刃	平均送り速度	: 100 mm/min
工作物材質	: A2017(アルミ合金)	平均主軸回転数	: 2012 rpm
切削幅	: 1 mm	薄肉部の高さ	: 25 mm
変動率	: $\pm 20\%$	変動周波数	: 1 Hz
切削形式	: アップカット	測定周波数	: 5000 Hz
備考	一刃あたりの送り量を一定とする		

図 5.48 変速切削法による薄物加工の切削力データ

5.3.5 薄物加工の理論解析

工具および工作物の変位と切削幅の関係について

工作物の切削点での x 軸方向の変位を $x_W(t)$ 、工具の x 軸方向の変位を $u(t)$ 、工具・工作物の x 軸方向の相対変位を $x(t)$ 、公称切削幅(設定切削幅)を R_{d0} 、実切削幅を $R_d(t)$ と置く(図5.49)[116]。再生効果を考慮すればこれらの間の関係は以下のようなになる。

$$x(t) = u(t) - x_W(t) \quad (5.2)$$

$$R_d(t) = \begin{cases} R_{d0} - (x(t) - \mu x(t-T)) & R_d(t) > 0 \\ 0 & R_d(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

μ は重複係数、 T は工具の i 番目の切れ刃が切削を開始してから、 $i+1$ 番目の切れ刃が切削を開始するまでにかかる時間を表す。

そこで、まず切削力による工作物の切削点での変位 $x_W(t)$ について考える。なお本節で使用した記号の意味についてはまとめて178ページおよび179ページに記した。

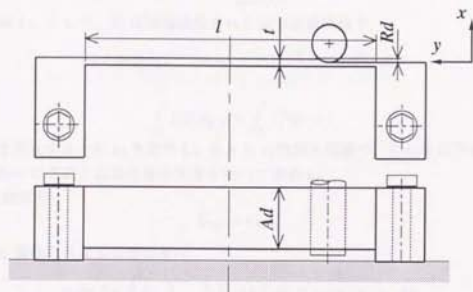


図 5.49 工具・工作物の関係

工作物の切削点での変位

工作物の切削点での変位を考えるにあたり、以下の仮定をおく。

1. 両端固定梁とする。
2. 横振動のみを考える。すなわちねじり振動および縦振動は無視する。
3. 周期的な外力が梁に沿って移動する。
4. 切削中の断面係数は変化しないとする。

たわみ線の一般式を

$$x_W(y, t) = \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_j Y_j \quad (5.4)$$

の形に表す。ここで、 Y_j は両端固定された梁の正規関数で

$$Y_j = \cosh k_j y - \cos k_j y - \alpha_j (\sinh k_j y - \sin k_j y) \quad (5.5)$$

であり

$$\int_0^l Y_j Y_i dy = 0, \int_0^l Y_i^2 dy = l \quad (5.6)$$

の条件を満たすように α_j を決める。また λ_j は時間の関数で、これを以下のように d'Alembert の原理と仮想仕事の原理を用いて求める。

仮想変位を

$$\delta x_W = \delta \lambda_j Y_j \quad (5.7)$$

とすると慣性力による仮想仕事は

$$-\rho_W A_W \int_0^l \left(\sum_{j=1,2,3,\dots} \ddot{\lambda}_j Y_j \right) \delta \lambda_i Y_i dy = -\rho_W A_W l \ddot{\lambda}_i \cdot \delta \lambda_i \quad (5.8)$$

弾性力による仮想仕事は、歪みエネルギー V を考えて計算できる。歪みエネルギー V は

$$\begin{aligned} V &= \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \right)^2 dy \\ &= \frac{EI}{2} \sum_{j=1,2,3,\dots} k_j^4 \lambda_j^2 \int_0^l Y_j^2 dy \\ &= \frac{EI}{2l^3} \sum_{j=1,2,3,\dots} (k_j l)^4 \lambda_j^2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

したがって、弾性力による仮想仕事は

$$-\frac{\partial V}{\partial \lambda_i} \cdot \delta \lambda_i = -\frac{EI}{l^3} (k_i l)^4 \lambda_i \cdot \delta \lambda_i \quad (5.10)$$

衝撃力による仮想仕事は、 x 軸方向の衝撃力 (切削抵抗) を Q_x とすると

$$Q_x \delta \lambda_i (Y_i)_{y=c} \quad (5.11)$$

ここで、 c は切削点の y 方向の位置を表す。式 (5.8)、式 (5.10)、式 (5.11) を加え合わせてその和を 0 にすれば λ_i の式が以下のように求まる。

$$\bar{\lambda}_i + \frac{EI}{A_W \rho_W l^4} (k_i l)^4 \lambda_i = \frac{Q_x}{A_W \rho_W l} (Y_i)_{y=c} \quad (5.12)$$

ここで

$$a^2 = \frac{EI}{A_W \rho_W} \quad (5.13)$$

とおけば、式 (5.12) は

$$\bar{\lambda}_i + \frac{a^2 (k_i l)^4}{l^4} \lambda_i = \frac{Q_x}{A_W \rho_W l} (Y_i)_{y=c} \quad (5.14)$$

となり、工作物の切削点での変位に関する運動方程式が求まる。

工具(エンドミル)の変位

エンドミルの運動方程式は、主軸方向(z軸方向)に微小分割した部分について剛体の運動を考えることによって、

$$\rho_T A_T \ddot{u}_0 = \frac{\partial P_z}{\partial z} \frac{\partial u_0}{\partial z} + \frac{dF_z}{dz} + \rho_T A_T u_0 \omega^2 + \frac{dQ_z}{dz} + P_z \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} \quad (5.15)$$

$$\rho_T A_T \ddot{v}_0 = \frac{\partial P_y}{\partial z} \frac{\partial v_0}{\partial z} + \frac{dF_y}{dz} + \rho_T A_T v_0 \omega^2 + \frac{dQ_y}{dz} + P_y \frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} \quad (5.16)$$

$$\rho_T A_T \ddot{w}_0 = \frac{\partial P_z}{\partial z} - \frac{dF_z}{dz} \frac{\partial u_0}{\partial z} - \frac{dF_y}{dz} \frac{\partial v_0}{\partial z} + \frac{dQ_z}{dz} + mg \quad (5.17)$$

$$I_x \frac{\partial \omega_x}{\partial t} + I_x \omega_y \omega_z = \frac{dM_x}{dz} - F_y + \sum_{j=1}^n (-r \cos \phi_j) \frac{dQ_{jz}}{dz} \quad (5.18)$$

$$I_y \frac{\partial \omega_y}{\partial t} - I_y \omega_x \omega_z = \frac{dM_y}{dz} + F_x - \sum_{j=1}^n (r \sin \phi_j) \frac{dQ_{jz}}{dz} \quad (5.19)$$

$$I_z \frac{\partial \omega_z}{\partial t} - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y = \frac{\partial T}{\partial z} + \sum_{j=1}^n \left\{ (r \sin \phi_j) \frac{dQ_{jy}}{dz} + (r \cos \phi_j) \frac{dQ_{jx}}{dz} \right\} \quad (5.20)$$

と表すことができる。ただし

$$\text{軸力 } P_z = \int_0^{A_d} dQ_z - P_0 \quad (5.21)$$

$$\text{トルク } T = T_0 + \int_0^{A_d} \sum_{j=1}^n \{ (r \sin \phi_j) dQ_{jy} + (r \cos \phi_j) dQ_{jx} \} \quad (5.22)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_0}{\partial z} &= \beta_x + \psi_x \\ \frac{\partial v_0}{\partial z} &= \beta_y + \psi_y \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

また、 (ψ_x, ψ_y, ψ_z) は回転角(傾き角)で

$$(\dot{\psi}_x, \dot{\psi}_y, \dot{\psi}_z) = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \quad (5.24)$$

は回転角速度である。

(β_x, β_y) は剪断力 (F_x, F_y) によるたわみ角である。

$$M_x \cong -EI_x \frac{\partial \psi_y}{\partial z} \quad (5.25)$$

$$M_y \cong -EI_y \frac{\partial \psi_x}{\partial z} \quad (5.26)$$

$$F_x = A_x \beta_x, \quad A_x = \frac{A_T G}{\kappa_x E I_x} \quad (5.27)$$

$$F_y = A_y \beta_y, \quad A_y = \frac{A_T G}{\kappa_y E I_y} \quad (5.28)$$

ただし、 G はねじり剛性、 A_T は断面積、 (I_x, I_y) は断面2次モーメント、 (κ_x, κ_y) は図心での x, y 方向剪断応力と平均剪断応力の比。

しかし一般に、 $\beta_x \ll \psi_x$, $\beta_y \ll \psi_y$ なので

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} = \frac{\partial \beta_x}{\partial z} + \frac{\partial \psi_x}{\partial z} = A_x^{-1} \frac{\partial F_x}{\partial z} + \frac{M_y}{E I_y} \cong \frac{M_y}{E I_y} \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} = \frac{\partial \beta_y}{\partial z} + \frac{\partial \psi_y}{\partial z} = A_y^{-1} \frac{\partial F_y}{\partial z} - \frac{M_x}{E I_x} \cong -\frac{M_x}{E I_x} \quad (5.30)$$

$$F_x \cong -\frac{\partial M_y}{\partial z} \quad (5.31)$$

$$F_y \cong -\frac{\partial M_x}{\partial z} \quad (5.32)$$

とおくと

$$\frac{\partial F_x}{\partial z} \cong -\frac{\partial^2 M_y}{\partial z^2} = -E I_y \frac{\partial^4 u_0}{\partial z^4} \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial z} \cong -\frac{\partial^2 M_x}{\partial z^2} = -E I_x \frac{\partial^4 v_0}{\partial z^4} \quad (5.34)$$

をこれらを式 (5.15)～式 (5.17) に代入すると

$$\rho_T A_T \ddot{u}_0 = \rho_T A_T u_0 \omega^2 - E I_x \frac{\partial^4 u_0}{\partial z^4} + P_x \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} + \frac{dP_x}{dz} \frac{\partial u_0}{\partial z} + \frac{dQ_x}{dz} \quad (5.35)$$

$$\rho_T A_T \ddot{v}_0 = \rho_T A_T v_0 \omega^2 - E I_y \frac{\partial^4 v_0}{\partial z^4} + P_y \frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} + \frac{dP_y}{dz} \frac{\partial v_0}{\partial z} + \frac{dQ_y}{dz} \quad (5.36)$$

$$\rho_T A_T \ddot{\omega}_0 = -E I_x \frac{\partial^4 u_0}{\partial z^4} \frac{\partial u_0}{\partial z} + E I_y \frac{\partial^4 v_0}{\partial z^4} \frac{\partial v_0}{\partial z} + m g + \frac{dQ_z}{dz} \quad (5.37)$$

を得る。また、モーメントの釣合から式 (5.18)～式 (5.20) を得る。

工作物の変位方向である x 軸方向について考え、簡単のため x 軸方向の変位は主軸 (z 軸) 方向に対して一定であると仮定すると、工具の運動方程式は

$$\ddot{u}_0 - \omega^2 u_0 = \frac{Q_z}{\rho_T A_T L_0} \quad (5.38)$$

これによれば復元力が出ないので、バネを考えることにする。つまり

$$-k_z \cdot u_0 \quad (5.39)$$

の力を付け加える。これは次の理由による。ここでは、簡単のために z 軸方向に沿って、工具の変位は等しいと仮定している。そのため、

$$-E_T I_z \frac{\partial^4 u_0}{\partial z^4} = 0 \quad (5.40)$$

となり、工具の曲げによる復元力が失われる。そのため

$$-E_T I_z \frac{\partial^4 u_0}{\partial z^4} \quad (5.41)$$

に相当するバネ力を考えた。

式(5.35)より工具の切削点での変位に関する運動方程式は

$$\rho_T A_T L_0 \ddot{u}_0 = \rho_T A_T L_0 \omega^2 u_0 - k_z u_0 + Q_x \quad (5.42)$$

となる。

安定性に関する考察

以上より、

工具の運動方程式:

$$\frac{d^2 u_o}{dt^2} + \left(\frac{k_z}{\rho_T A_T L_o} - \omega^2 \right) u_o = \frac{1}{\rho_T A_T L_o} Q_z \quad (5.43)$$

工作物の運動方程式:

$$\frac{d^2 \lambda_i}{dt^2} + \frac{a^2 (k_i l)^4}{I^4} \lambda_i = \frac{Y_i |_{y=c}}{A_W \rho_W l} Q_z \quad (5.44)$$

切削力:

$$Q_z = \sum_{j=1}^n \int C h_j^{1-\epsilon} \cdot \cos \phi_j \cdot \sin(\phi_j - \theta_j) dz \quad (5.45)$$

$$h_j = S_z \sin \phi_j + Y_i |_{y=c} \{ \lambda_i(t) - \lambda_i(t-T) \} \cos \phi_j - \{ u_o(t) - u_o(t-T) \} \cos \phi_j \quad (5.46)$$

$$\phi_j = \phi(1, 0, 0) + \frac{2\pi}{n}(j-1) - \frac{\sin \gamma}{r} z + \omega t \quad (5.47)$$

と工具・工作物系のモデルが記述できた。さて一般的には、振動発生を図 5.50 のようなフィードバック系で考える [117]。求めた運動方程式をラプラス変換して機械構造と切削過程のコンプライアンス伝達関数をそれぞれ $R_M(s)$ 、 $R_C(s)$ として求めると、一巡伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) = \frac{R_M(s)}{R_C(s)} \quad (5.48)$$

となる。ナイキストの安定判別によれば、 $s = j\omega$ を代入したとき、

$$1 - G(j\omega) = 0 \quad (5.49)$$

が安定限界を与える。

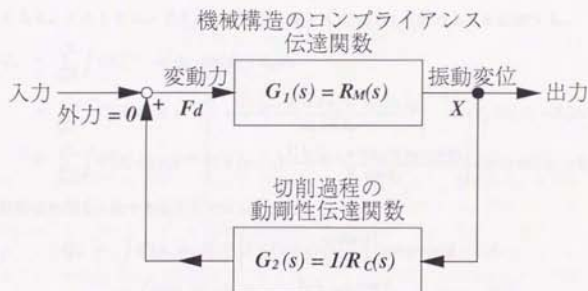


図 5.50 振動発生フィードバック系

この手法は切削中の各系の振動特性を与えたときにできる各伝達関数の曲線を複素平面上に描き、その交点を図式的に求めることによって、式(5.49)の解を得ることができる。

薄物加工においては、式(5.44)において正規関数の解である Y_i が含まれており、これは切削位置によって変化する。したがってもし式(5.49)の解を求めるような従来の手法では、 Y_i が変化するごとに伝達関数の曲線を複素平面上に描く必要があり、制御手法を考える上で見当を立てるのが難しい。

今工作物の変位に関する運動方程式を取り上げ、また簡単のため再生効果を無視すると、切削厚さについて式(5.47)は、

$$h_j = S_z \sin \phi_j + Y_i|_{y=c} \lambda_i(t) \cos \phi_j - u_0(t) \cos \phi_j \quad (5.50)$$

となる。このときエンドミルの切削力に関する式(5.46)を次のように近似する。

$$\begin{aligned} Q_x &= \sum_{j=1}^n \int C h_j^{1-\varepsilon} \cdot \cos \psi_j \cdot \sin(\phi_j - \theta_j) dz \\ &= \sum_{j=1}^n \int C \{S_z \sin \phi_j\}^{1-\varepsilon} \left[1 + \frac{Y_i|_{y=c} \lambda_i \cos \phi_j - u_0 \cos \phi_j}{S_z \sin \phi_j} \right]^{1-\varepsilon} \cos \psi_j \sin(\phi_j - \theta_j) dz \\ &\simeq \sum_{j=1}^n \int C \{S_z \sin \phi_j\}^{1-\varepsilon} \left[1 + (1-\varepsilon) \frac{Y_i \lambda_i|_{y=c} \cos \phi_j - u_0 \cos \phi_j}{S_z \sin \phi_j} \right] \cos \psi_j \sin(\phi_j - \theta_j) dz \end{aligned}$$

同時切れ刃を1枚であるとして $n=1$ とすると

$$\begin{aligned} Q_x &= \int C \{S_z \sin \phi\}^{1-\varepsilon} \left[1 + (1-\varepsilon) \frac{u_0 \cos \phi}{S_z \sin \phi} \right] \cos \psi \sin(\phi - \theta) dz \\ &\quad + \int C \{S_z \sin \phi\}^{1-\varepsilon} (1-\varepsilon) \frac{Y_i \lambda_i|_{y=c} \cos \phi}{S_z \sin \phi} \cos \psi \sin(\phi - \theta) dz \\ &= Q_1 + \frac{C S_z^{1-\varepsilon} (1-\varepsilon) Y_i \lambda_i}{S_z} \int \frac{\cos \phi}{\sin^{\varepsilon} \phi} \cos \psi \cos(\phi - \theta) dz \quad (5.51) \end{aligned}$$

$$\simeq Q_1 + C S_z^{-\varepsilon} (1-\varepsilon) Y_i \lambda_i \cos \phi \cdot \frac{r}{\tan \gamma} \quad (5.52)$$

と近似できる。このように近似して、 λ_i を分離したあとと工作物の運動方程式式(5.44)に代入し整理すると以下ようになる。

$$\frac{d^2 \lambda_i}{dt^2} + \left(a^2 k_i^4 - \frac{(1-\varepsilon) C S_z^{-\varepsilon} Y_i^2}{A_W \rho_W l} \frac{r}{\tan \gamma} \cos \phi \right) \lambda_i = \frac{Y_i|_{y=c}}{A_W \rho_W l} Q_1 \quad (5.53)$$

ここで

$$\phi = 2\omega t \quad (\omega \text{は主軸回転の角速度、切れ刃2枚より}) \quad (5.54)$$

とおきかえ式(5.53)を ϕ に関する微分方程式に書き換えると

$$\frac{d^2 \lambda_i}{d\phi^2} + \left(\frac{\omega_0}{2\omega}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{A_W \rho_W l a^2 k_i^4} (1-\varepsilon) C S_i^{-\varepsilon} a_1 Y_i \Big|_{y=c} \cdot \cos \phi\right) \lambda_i = \frac{Y_i \Big|_{y=c} Q_1}{A_W \rho_W l} \quad (5.55)$$

となる。さらに

$$k_W = A_W \rho_W a^2 k_i^4 \quad (5.56)$$

$$\omega_0^2 = a^2 k_i^4 \quad (5.57)$$

$$v = \frac{\omega_0}{2\omega} \quad (5.58)$$

$$\mu = \frac{1}{A_W \rho_W l a^2 k_i^4} (1-\varepsilon) C S_i^{-\varepsilon} Y_i \Big|_{y=c} \quad (5.59)$$

とおくと、

$$\frac{d^2 \lambda_i}{d\phi^2} + v^2 (1 - \mu \cos \phi) \lambda_i = \frac{Y_i \Big|_{y=c} Q_1}{A_W \rho_W l} \quad (5.60)$$

の形になり、この同次方程式である

$$\frac{d^2 \lambda_i}{d\phi^2} + v^2 (1 - \mu \cos \phi) \lambda_i = 0 \quad (5.61)$$

はマシュー方程式と呼ばれる[118, 119, 120, 121]。この方程式は剛性係数が時間に依存する点が特徴的である。式(5.61)の解の形は無次元係数 μ と、振動数比 v に依存する。そして μ と v の組み合わせによって解の安定性が決定される。横軸に v^2 、縦軸に μv^2 をとり、式(5.61)の振動解を与える $(v^2, \mu v^2)$ をプロットすると、図5.51のグラフが得られる[122]。図5.51において、ハッチされた領域にあるような v と μ をとる時、解は安定となり、境界部分およびハッチされていない領域では解は不安定となる。

式(5.61)における μ は式(5.59)でわかるように正規関数の解 Y_i を含む。工具が工作物の梁の部分移動すると切削点での正規関数 Y_i は図5.52に示すように変化する。ただし図5.52は $i=1$ の1次モードの場合を表している。

図5.51においては、式(5.59)より点 $(v^2, \mu v^2)$ は μv^2 の軸に平行な直線上を $\mu v^2 = 0$ から Y の最大値に対応する点まで動き、再び $\mu v^2 = 0$ へ戻る。例えば、1982rpmの場合の軌跡は直線AB上を $A \rightarrow B \rightarrow A$ と移動する。その過程において境界線を通過する時や不安定領域に入ると振動が発生すると考えられる。

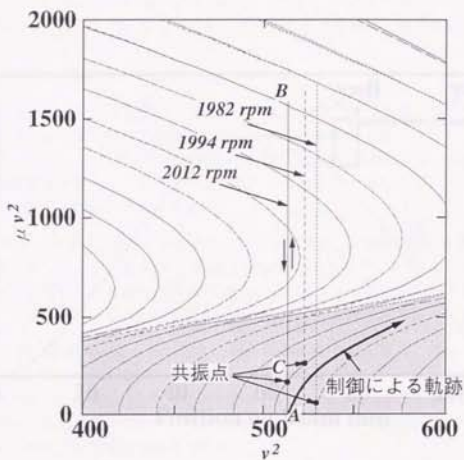


図 5.51 マシュー方程式の安定判別図

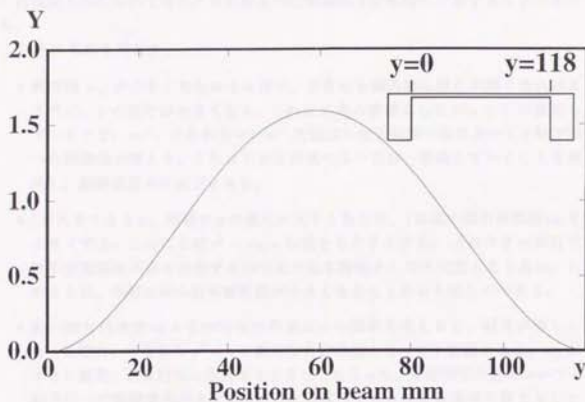


図 5.52 両端固定梁の正規関数

そこで異なる主軸回転数で切削実験を行ない、そのときの梁の端からびり発生点までの距離を測定した。図 5.35 に示した工作物(材質 A2017)を用意し、工具はスクエアエンドミルでφ15、ねじれ角30°、2枚刃のものをを用いた。切削条件は、主軸回転数を1982 rpm, 1994 rpm, 2012 rpmの3通りでいずれも送り速度100 mm/minとし、切削幅 $Rd=1$ mmで切削を行なった。

加工面のびり痕と切削力の様子を観察することにより、加工開始側の梁の端からびり発生点までの距離を測定した。その結果びり発生点までの距離は、1994 rpm (19.5 mm) > 2012 rpm (14.0 mm) > 1982 rpm (11.5 mm) の順となった。これは図 5.51 において得られる共振点の位置関係と定性的に一致することがわかる。

以下に考察を行なう。

- 断面積 A_W が小さくなればなるほど、すなわち薄肉部の厚さが薄くなればなるほど、 μ の変化が大きくなる。これは工具の移動にしたがって Y_1 が変化していくとき、 μv^2 、すなわちマシュー方程式の安定判別の図において y 軸方向への移動量が増える。これは不安定領域の広い部分へ移動していくことを意味し、振動状態が不安定となる。
- l が大きくなると、同様に μ の変化が大きくなるが、 l は梁の固有振動数 ω_0 を小さくする。このことは $v^2 = \omega_0/\omega$ の値をも小さくする。 v^2 の小さい部分では不安定領域が密に存在するので梁の基本特性として不安定となり易い。このことは、単純に梁の固有振動数が小さくなることから明らかである。
- 梁の固有角速度 ω_0 と主軸回転の角速度 ω の関係を考えると、両者が等しくなった場合、すなわち $v^2 = 1$ の場合は共振状態となって不安定となる。 ω_0 が小さい場合、基本的に ω を大きくすることによって、安定判別の図において y 軸方向への移動量が小さくなる。これにより $y \leq x$ の安定領域に留まることができれば、安定状態を実現できる。
- 制御方針を立てるときには加工が進むにつれて正規関数の解 Y_1 や断面二次モーメントが変化するがそれに応じて主軸回転数を常に安定領域にあるように制御することを考えることができる。例えば工具の移動とともに主軸回転数を下げていくことによって図 5.51 において「制御による軌跡」が表すような軌跡を描くことが可能であれば、係数励振振動は発生しないと考えられる。
- 実際には梁の減衰項の存在や、再生効果などの加工現象を考慮した運動方程式(マシュー方程式)を立てて、安定判別の図を記述する必要がある。

- 境界においては時間 t の1次のべきで無限大になる非有界な解が存在する。すなわち境界においては振動が発散するが、即座には発散せずある程度の時間を要する。したがって、この境界を振動が発達するまえに素早く通り過ぎるように主軸回転数を変化させることは有効である。変速切削法の有効性の一根拠はここにあると考えられる。

使用している記号とその意味

工作物

- x_W : 工作物の x 軸方向のたわみ
 λ_j : x_W を変数分離したときの時間依存項
 Y_j : x_W を変数分離したときの両端固定梁の正規関数
 k_j : 振動数方程式の i 次の解
 l : 工作物の梁の長さ
 ρ_W : 工作物の比重
 A_W : 工作物の梁の断面積
 E_W : 工作物の縦弾性係数
 I_W : 工作物の梁の断面係数

工具

- u_0 : 工具の x 軸方向の変位
 v_0 : 工具の y 軸方向の変位
 w_0 : 工具の z 軸方向の変位
 ω_k : 工具の微小部分の回転角速度 ($k = x, y, z$)
 r : 工具半径
 L_0 : 工具の突き出し長さ
 γ : ねじれ角
 ρ_T : 工具の比重
 A_T : 工具の断面積
 m : 工具の微小部分の質量
 k_x : 工具の x 軸方向の等価バネ定数
 E_T : 工具の縦弾性係数
 I_k : 工具の断面二次モーメント ($k = x, y$)
 G : ねじり剛性
 P_z : 軸力
 F_x, F_y : x 軸および y 軸方向の摩擦力
 M_x, M_y : x 軸回りおよび y 軸回りのモーメント

切削力の物理モデル

- Q : 全切削抵抗
 Q_k : 切削抵抗の k 軸方向の成分 ($k = x, y, z$)
 R_d : 切削幅
 h : 切削厚さ
 dQ_i : i 番目の切れ刃にかかる微小切削抵抗
 dQ_{ik} : i 番目の切れ刃にかかる微小切削抵抗の k 軸方向成分 ($k = x, y, z$)
 ψ_i : i 番目の切れ刃にかかる微小切削抵抗が xy 平面となす角度
 θ_i : i 番目の切れ刃にかかる微小切削抵抗の xy 平面への正射影成分が x 軸方向となす角度
 A_d : 切削深さ
 S_z : 切れ刃一枚あたりの送り量
 dA : 微小切削面積
 k_p : 比切削抵抗
 C : 比切削抵抗の比例係数
 ϵ : 比切削抵抗の指数係数
 h_0 : 静的に幾何形状から決まる切削厚さ
 u : 切削厚さの変動成分
 T : i 番目の切れ刃が切削を開始してから、 $i+1$ 番目の切れ刃が切削を開始するまでの時間
 ϕ_j : j 枚目の切れ刃の回転角
 ω : 工具の回転角速度

6.1 外部制御可能な加工機械

これまでに電流値を監視して異常の認識や、NCソフトウェアの記述に応じた送り速度や主軸回転の加減速制御は行われてきている。またFAコンピュータを導入し、加工機械からの異常信号やスピンドルの電流値などを処理し、集中管理システムへ情報を転送し生産システム全体を統括することが行われている。

しかしながら、加工機械の種々の状態を監視するために種々のセンサを取り付けその信号を処理し、その結果に応じて加工機械の動作を決定するなど高度な機能を実現する場合を考えると、情報処理の手法はセンサの種類やハードウェア構成によりさまざまであったり、専用の制御器の機能では不十分であるために、センサ情報を十分に活用して加工機械を制御することが難しい。

一方加工機械を制御するパラメータの種類は加工機械によってあらかじめ限定することが可能である。加工機械に外部入出力端子を装備して、加工機械側から出力可能な状態量や加工機械を制御するパラメータを取り出したり変更するほうが、都合がよい。このように外部入出力端子を装備することにより、情報のフィードバックループを形成することが可能となる。

このように、加工機械自身の制御装置を高機能化することはもちろん重要であるが、外部の制御器とのインタフェースを持つことによって、より多くの加工機械に機能を付加することができる。一般に外部制御器やその入出力装置や信号処理装置は汎用のものを利用することになるので、コスト的にも有利である。また汎用の制御器を介して容易に他のシステムとの結合も可能となる。

本研究では加工機械として、MAZAK(山崎鉄鋸所)製のマシニング・センタ(VQC-15/40)を使用している(図6.1、表6.1)。そしてマシニング・センタの状態を取り出したり、マシニング・センタの動作を制御するための外部入出力端子を特別に装備した。この端子を通じて、マシニング・センタから異常信号、主軸回転数、工具位置を取り出すことができ、外部のコンピュータから主軸回転の停止、起動、回転速度の設定、送り速度および送り量の設定を行なうことが可能となっている。またフェイルセーフ機構からの非常停止信号はマシニング・センタが標準で持っている非常停止用の信号回路に接続されている。非常停止用スイッチは本来作業を行なっている人間が、異常を認識したときに押すものであるが、これにより自動あるいは無人運転においては、加工機械が自らの異常を検知して自ら非常停止をかける機能を実現することができる。

外部入出力端子を装備したことで、6.4で示す実時間制御器による外部制御が可能となる。これにより、加工機械は一つのフィードバック・ループを形成することになり、加工機械の自己診断機能、自己修正機能および自己学習機能を実現する

ことが可能となる。さらに、加工機械側のハードウェア構成を変更することなく、加工機械に状況に応じたさまざまな機能を付加することができる。また逆に加工機械側にあとからセンサを付加しても柔軟に対応でき、新たに付加したセンサによって得られる情報を最大限にフィードバックできる。さらに、加工機械を囲む作業環境やシステム環境が変化しても、制御器によって対応することができる。

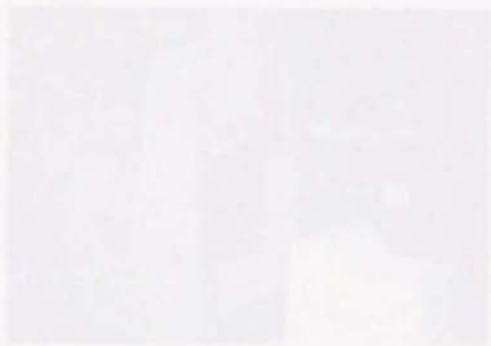


図 6.10 マルチセンサ融合型加工機械の構成



図 6.1 マシニング・センタ (VQC-15/40) の概観

1993 年度学位論文『多軸力情報を用いた知能化生産システムの研究』

表 6.1 マシニング・センタ (VQC-15/40) の仕様

テーブル寸法	410×900 [mm]
軸移動量	560 [mm]
	410 [mm]
	381 [mm]
位置決め精度	± 3 [μ m]
繰り返し位置決め精度	± 1 [μ m]
早送り速度	18 [m/min] (x、y 軸)
	14 [m/min] (z 軸)
切削送り速度	1 ~ 5000 [mm/min]
主軸回転数	60 ~ 6000 [rpm]
最大主軸トルク	3.6 [kg · m]
工具収納本数	16 [本]
ツール・シャンク形式	MAS BT-40
機械重量	4200 [kg]

6.2 工作物側加工反力検出センサ(6分力テーブル)

6.2.1 工作物側加工反力検出センサに要求される機能

高精度、高品質の加工が行なわれるためには、加工機械の剛性に頼るだけでは不十分であることをすでに述べてきた。加工現象は非常に多くの要素が絡んで発生するため、すべてをモデルによって予測することは困難である。さらに加工機械が自律的に加工を行なうためには、自らの状態を認識するための情報を獲得する必要がある。

加工においては力と熱を発生しているが、特に加工現象をよく表しているのは加工反力である。従来から切削理論の目的の一つとして加工における力を予測することが研究されているのは切削力と加工現象が非常に密接であるためである。

そのため x, y, z の3軸方向の力や3軸回りのモーメントの6軸力成分を分離して検出する多軸力センサは、従来から力の発生する現象の解明のために用いられてきた。最近では、ロボットや加工機械などに力制御、作業状況の把握、遠隔操作の支援のためにも多軸力センサの必要性が高まり、開発、利用されている。

加工においては位置、姿勢とも3次元であるため、作用する力や位置の大きさを知るためには基本的に3軸方向の力の各成分と3軸回りのモーメントを検出する必要がある。特にマシニング・センタのように、フライス加工、エンドミル加工、ドリル加工、タップ加工など多くの種類を一つの加工機械の上で行なう場合、加工の種類によって加工現象をもっともよく表している力の種類は異なる。また研削加工を自動的に行なう場合には、位置制御では十分な精度を得ることが難しいので、多軸力センサから獲得した情報により研削砥石の位置と姿勢を知るとともに力制御を行なうことになる。この場合には6軸力成分すべてが必要な情報となる。

多軸力センサに要求される機能は、

1. 力やモーメントの各成分が他成分と干渉を起こさず検出できること、
2. 剛性・固有振動数が高く、センサを挿入したことで系の力学特性ができるだけ変わらないこと、
3. センサ本体ができるだけコンパクトにできあがること、
4. コストが安く信頼性が高いこと

があげられる。特に加工においては精度はもちろんであるが、高剛性と熱に対する安定性が重要な課題となる。このような仕様を満たす加工用の多軸力センサはほとんど市販されていない。

6.2.2 6分力テーブルの構造と特性

前節の機能を考慮し、剛性に対しては力検出部を薄肉円筒および薄肉円環により構成することで対処し、熱に対しては内部にフィン構造を作り込むことにより対処した、6軸力センシングテーブル(6分力テーブルと呼ぶ)を開発した[123]。

図 6.2に6分力テーブルの概観、図 6.3に6分力テーブルの断面を表した模式図を示す。各軸方向の力および各軸回りのモーメントを検出するために、薄肉部に歪ゲージを貼りつけている(図 6.4)。x軸方向の力、y軸方向の力、およびz軸回りのモーメントを円筒部の剪断変形にともなう歪により検出し、x軸回りのモーメント、y軸回りのモーメント、およびz軸方向の力を円環部に発生する歪により検出している。一方熱伝達部はこの薄肉円筒の中に配置され、同心円上の円筒フィンを交互に配し、そのすき間に伝熱媒体である水を満たして熱の授受を行なう。

6分力テーブルの定格は、x軸方向およびy軸方向は2000N、z軸方向は3000Nである。表 6.2に剛性を、表 6.3に固有振動数を示す。加工機械のボールネジと直線軸受の剛性が一般に約100 μm 程度であることより、十分大きな剛性であることがわかる。

表 6.4に歪と力およびモーメントの関係を表した補償行列を示す。これより対角成分に対して他の成分が小さく、干渉の小さいことがわかる。また歪と力およびモーメントについて直線性と非ヒステリシス性も良好であった。

歪検出のための薄肉部を有するため、加工熱が6分力テーブルの上面で発生すると6分力テーブルの上面と下面との間に温度差が発生する。そのため、例えば薄肉円筒の上部と下部の間に相対変位が発生するので、これにともなう歪出力が検出され、最悪の場合薄肉部が破断することが起こる。これは上面で発生した熱を効率良く下面に逃がす経路を挿入することによって解決できる。これを実現するものが、円筒フィンである。

加工発熱を想定して、6分力テーブルの上部にヒータを、下部に熱容量の大きい定盤を、それぞれ接触させて熱を力検出部に流した場合の、薄肉円筒の上下の温度変化を図 6.5に、薄肉円筒と薄肉円環の円周方向の歪変化を図 6.6示す。

フィン/水媒体をいれると、図 6.5より薄肉円筒の上下間の温度差が10℃と水をいれない場合の約3/4と小さく、通過熱量が減少していること、図 6.6より薄肉部の歪が、 40×10^{-6} と水をいれない場合の約2/3と小さく、熱応力が減少していることがいえる。

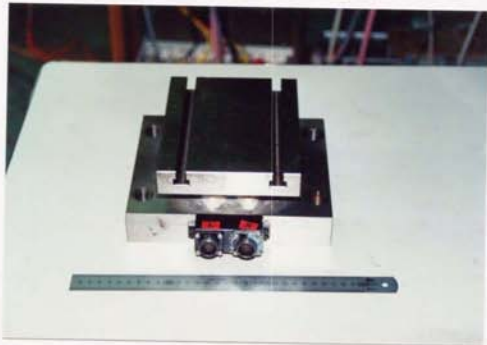


図 6.2 6 分力テーブルの概観



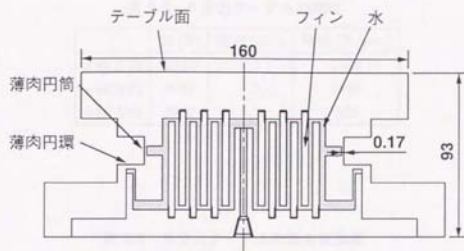


図 6.3 6 分力テーブルの断面

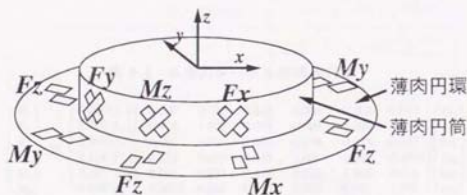


図 6.4 力を検出する歪ゲージの位置

表 6.2 6 分力テーブルの剛性

	力 (N)	変位 (μm)	剛性 ($\text{N}/\mu\text{m}$)
x 軸方向	2940	1.5	1960
y 軸方向	2940	1.5	1960
z 軸方向	2940	5.2	565

表 6.3 6 分力テーブルの固有振動数

	固有振動数 (kHz)
x 軸方向	1.25
y 軸方向	1.08
z 軸方向	1.43

表 6.4 6 分力テーブルの補償行列

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.900 \cdot J_1 & 1.000 & 0.012 & 0.008 & -0.006 & -0.006 & -0.012 \\ 5.210 \cdot J_2 & -0.016 & 1.000 & -0.008 & -0.099 & -0.008 & 0.001 \\ 3.400 \cdot J_3 & 0.003 & 0.006 & 1.000 & -0.016 & 0.014 & -0.017 \\ 0.114 \cdot J_4 & -0.022 & 0.003 & 0.050 & 1.000 & -0.001 & -0.0003 \\ 0.107 \cdot J_5 & 0.011 & -0.024 & 0.029 & 0.005 & 1.000 & 0.008 \\ 0.435 \cdot J_6 & -0.0003 & -0.026 & 0.006 & -0.001 & -0.011 & 1.000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{fx} \\ E_{fy} \\ E_{fz} \\ E_{mx} \\ E_{my} \\ E_{mz} \end{pmatrix}$$

(N, Nm) (μm)

但し、 $J_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$, $J_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$, とする。

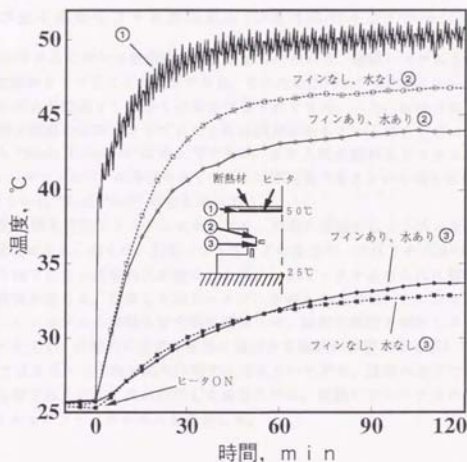


図 6.5 テーブル上面を加熱した時の薄肉円筒上下の温度変化

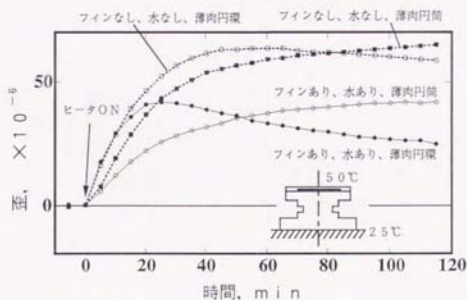


図 6.6 テーブル上面を加熱した時の力検出部に生じる歪

6.3 フェイルセーフ・メカニズム (フェイルセーフ・テーブル)

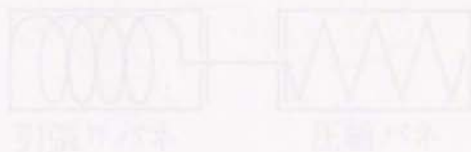
機械システムにおいて信頼性を向上させるためには、機械システムを構成する要素の故障率を下げるのが基本である。そのため如何にして故障しないシステムを開発するかを課題として多くの努力がなされてきた。一方、如何に努力したとしても構成要素の故障率を下げることに限界があるという考え方がでてきた。すなわち“Fault Tolerance”の考え方である。また人間が関わるシステムにおいては、ヒューマン・エラーの存在をなくすることは不可能であるという考えから、“Fail Safe”あるいは“Fool Proof”の考え方がある。

将来的な無人化加工システムにおいても、不測の事態からシステムを保護する機構が必要になる。例えば、制御ソフトウェアの暴走や、びびりや工具の欠損・折損など予期できない異常加工が発生した場合、加工システムやそれに搭載したセンサの破壊が起こる。自律した加工システムを考える上では、このような異常事態に対してシステムの状態を安全側に遷移させ、異常の原因を解析しその原因を取り除いた上で、自動的に正常な状態に復帰する機能が必要である [73, 124]。

ここでは工具・工作物の間に作用する力について考え、通常の加工では非常に剛であり設定以上の加工力が作用した場合にのみ、退避してシステムの安全を図るフェイルセーフ・メカニズムを開発した。

6.3.1 フェイルセーフ・メカニズムの原理

加工システムにおけるフェイルセーフ機構には、設定荷重(予圧)以内の負荷が作用している場合は、剛体とみなすことができ、予圧以上の過負荷が作用した場合には大きく変位して、これを吸収する機能が要求される。この機能を実現する力-変位特性を図 6.7 に示す。この特性を実現するモデル(フェイルセーフユニット)を図 6.8 に示す。図 6.8 では、予圧を与える素子としてバネを使用している。正の方向と負の方向の2方向に対しての予圧を得るために、縮み方向に初期変位を与えたバネと伸び方向に初期変位を与えたバネを直列に配置する。これにより予圧を超える負荷がかかった場合、図 6.9 に示すように回避動作が行なわれ、過負荷は吸収される。



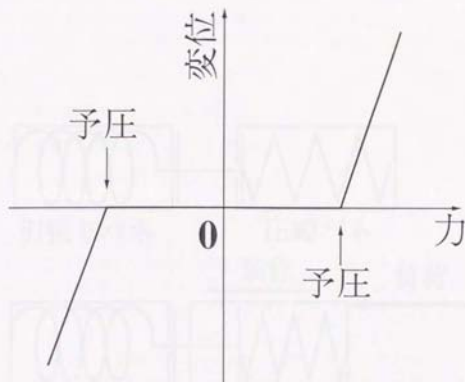


図 6.7 フェイルセーフ機構が実現すべき力-変位特性

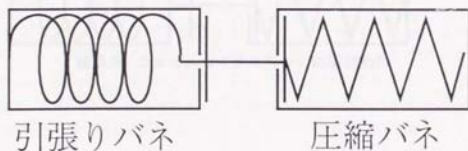


図 6.8 フェイルセーフユニットのモデル

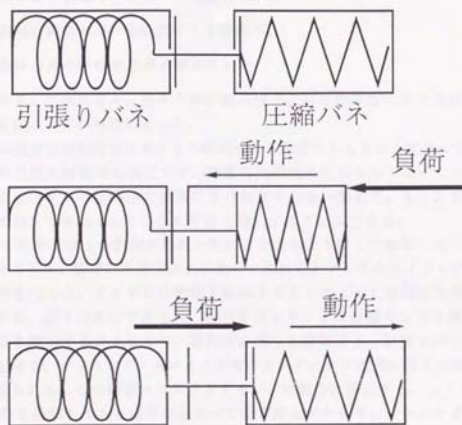


図 6.9 フェイルセーフユニットの退避動作

6.3.2 フェイルセーフ・テーブルの構造

本研究において開発したフェイルセーフ・テーブルの構造を図 6.10 に、また実際の概観を図 6.11 を示す。外形寸法は、412mm × 464mm × 123mm である。著者の所属する研究室では以前にも同じ概念に基づいてフェイルセーフ・テーブルを試作した。このときは、剛性が非常に低いことが問題として残った。今回の改善点は、

1. 1 軸当たりのフェイルセーフ・ユニットを 1 つにし、
2. 圧縮バネと引張りバネを一体構造にし、
3. 横方向の剛性の高い LM ガイドを使用し、
4. 構造体自身の剛性が上がる構造にした

ことである。これにより、当たり面の数が減り、がたが少なくなり全体として高い剛性を得ることが可能になった。

予圧の設定は初期変位をボルトの回転による変位で与えることによって行なう。このため予圧は無段階に設定でき、非常に汎用性の高いものとなっている。そのため加工システムの系の中で保護しなければならない要素で、もっとも定格の低いものに対して有効であるように予圧を設定することができる。

設定した予圧以上の負荷が加わったことを次のようにして検知している。すでに述べたように、設定した予圧以上の負荷が加わるとフェイルセーフ・テーブルは退避動作を行なう。そこでこの変位を検知することによって過負荷を検知する。具体的には、図 6.12 に示すように、各バネのフランジに近接センサを置きこの相対変位を検出することにより、過負荷の発生を検知する。近接センサの信号は増幅器を経て、マシニング・センタの非常停止スイッチと直列に挿入されたリレー回路へ送られる。この結果マシニング・センタの動作は停止する。

過負荷を検知してから信号が伝わって非常停止がかかり、マシニング・センタの慣性を含めて実際に動作が停止するまでに、時間遅れが存在する。したがって通常の検出装置によって検知するだけではシステムを保護することはできない。しかしながら、本フェイルセーフ・メカニズムにおいては、メカニカルに退避動作が行なわれ過負荷が吸収されるため、このような時間遅れは問題にならないことも重要である。

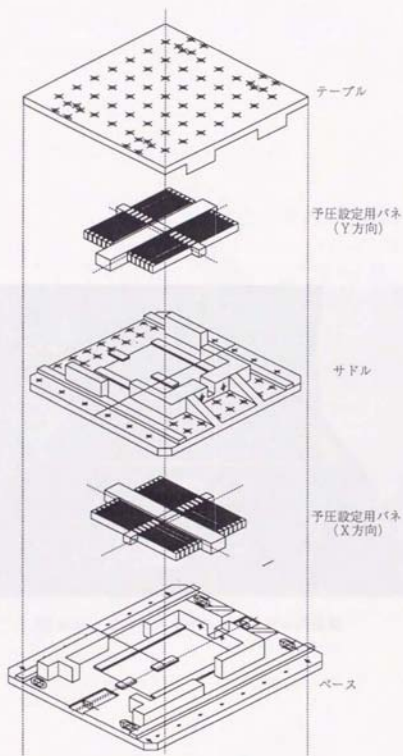


図 6.10 フェイルセーフ・テーブルの構造



図 6.11 フェイルセーフ・テーブルの概観

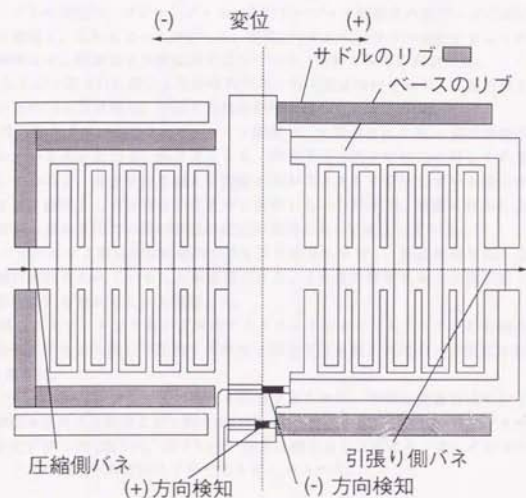


図 6.12 フェイルセーフ・テーブルの変位検出部

6.3.3 カ-変位静特性実験

開発したフェイルセーフテーブルをマシニングセンタに搭載し、カ-変位特性実験を行なった(図 6.13)。図中座標軸はマシニング・センタの座標系を示したものである。荷重を測定するために6.2で述べた6分力テーブルを使用しテーブルの上に取り付けた。その上にコンプライアンスとして薄肉部をもつ工作物を取りつけ、これに主軸を押しつけることにより荷重を負荷した。一方フェイルセーフ・テーブルの変位は、マシニング・センタのテーブルに接触式の歪ゲージ式変位センサを固定し、これによって測定した。荷重は0Nより20Nづつ増加するように主軸を移動させ、荷重および変位が安定してから、両者を同時に測定した。

図 6.14～図 6.17に測定した各軸各方向のカ-変位特性を示す。圧縮方向とは各軸の正の力を受け持ち、引張り方向は各軸の負の力を受け持つ。

得られたグラフよりフェイルセーフ機構として要求されるカ-変位特性が実現されているのがわかる。各グラフとも、設定予圧付近までは力に対してあまり変位しておらず、設定予圧を越える荷重が加わると大きく変位している様子が観察できる。理想としては設定予圧までは変位しないわけだが、実際には力による弾性変形や当り面での接触状態の変化が原因となって変位している。

いずれにせよ設定荷重範囲内では変位が非常に小さく、設定荷重を超えると退避動作が行なわれていることが確認できる。また設定荷重において再現性よく退避動作が行なわれることも確認した。

得られたデータより最小自乗法によりフェイルセーフ・テーブルの各軸各方向の剛性、すなわち設定予圧内での剛性と設定予圧を越えた時のバネ定数を計算した(表 6.5)。

フェイルセーフテーブルの剛性を評価するために、同様の荷重方法により静止座標系からみたx軸およびy軸方向のベッドの変位を測定し、マシニング・センタ剛性を計算した(表 6.6)。表 6.5と表 6.6を比較することにより、フェイルセーフ・テーブルの剛性が実用的に十分であることが分かる。

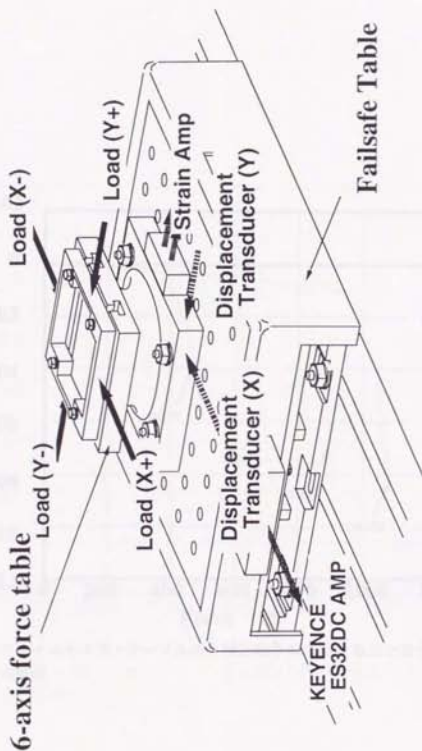


図 6.13 力変位特性実験の様子

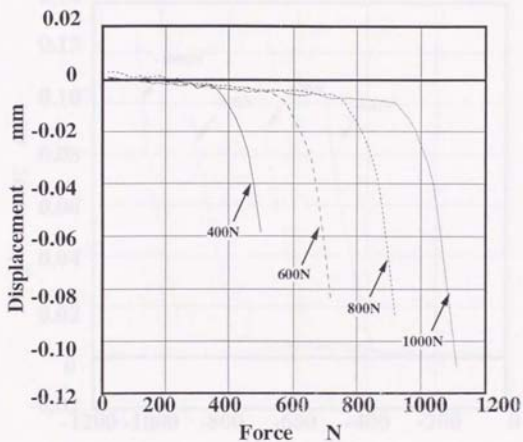


図 6.14 フェイルセーフ・テーブルのx軸圧縮方向における力と変位の関係

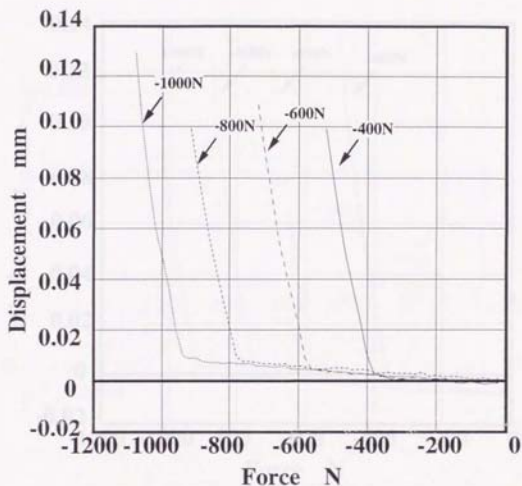


図 6.15 フェイルセーフ・テーブルのx軸引張り方向における力と変位の関係

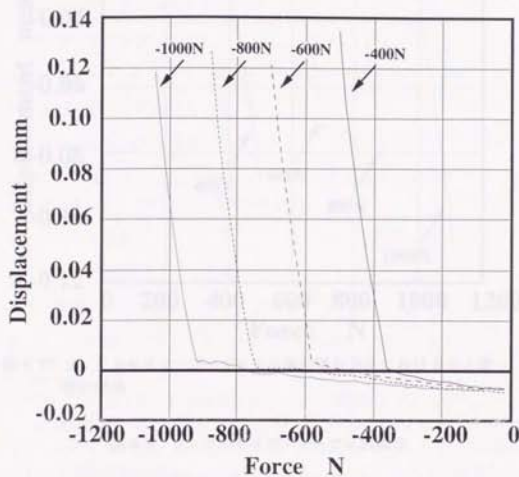


図 6.16 フェイルセーフ・テーブルのy軸圧縮方向における力と変位の関係

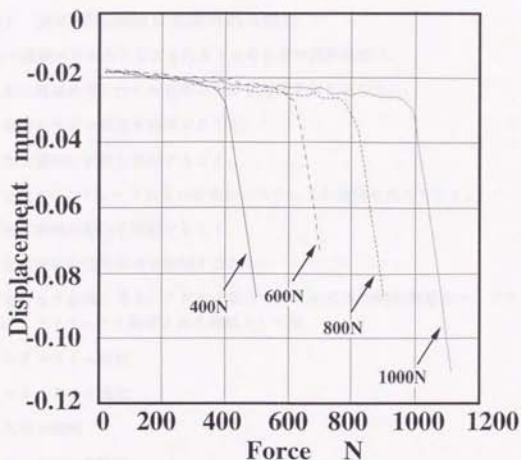


図 6.17 フェイルセーフ・テーブルのy軸引張り方向における力と変位の関係

表 6.5 フェイルセーフ・テーブルの剛性

x軸圧縮	x軸引張り	y軸圧縮	y軸引張り
110N/ μ m	88N/ μ m	93N/ μ m	185N/ μ m

表 6.6 マシニング・センタの剛性

	x軸方向	y軸方向
剛性 (N/ μ m)	32	17

6.4 実時間制御器

6.4.1 実時間制御器に要求される機能

加工機械が自律的に加工を行なうために実時間制御器は、

1. 加工機械に取り付けた複数のセンサ情報を取り込むこと、
2. 複数のセンサ情報を処理すること、
3. 加工機械の状態を判定すること、
4. 上位のコンピュータあるいは他のシステムとの通信を行なうこと、
5. 加工機械の動作を制御すること、
6. 加工機械の異常信号を処理すること

などを行なう必要がある。これらを実行するために実時間制御器のハードウェアおよびソフトウェアに要求される機能としては

1. リアルタイム機能
2. マルチタスク機能
3. 入出力機能
4. ネットワーク機能

が上げられる。

ハードウェアとしては上記の機能の他に、(i) 耐環境性、(ii) 信頼性、(iii) 保存性、(iv) 拡張性などの特性も要求される。特に拡張性については、(a) オープンシステム設計ができること、(b) ネットワークへの対応ができること、(c) 多種多様なI/O機器に接続可能であることが重要である。オープンシステム設計については、ハードウェアとして標準バスを採用する傾向にある。生産システムにおいて32ビット系ではVMEバスを採用するところが多い。VMEバスはモトローラ、モステック、シグネティクスが共同で開発したM68000ファミリのためのバスである[125]。標準バスを使用することにより、汎用の信号処理ボードやI/Oボードなどを利用することができるので、機能性、経済性においても利点がある。ネットワーク機能は個々の機械の情報授受とともに生産システム全体の運用においても重要である。FA-LANとしてMAP(Manufacturing Automation Protocol)が上げられる

が、工場内だけの通信だけでなく工場外との情報通信を考えるとTCP/IPの採用も考えられる。

リアルタイム機能は、加工機械だけでなく生産システム全体が種々の管理や監視、センサ・制御情報の処理、システムの制御、システム内の異常処理、実時間制御器自身の異常処理などが円滑に運用されるために必要な機能といえる。

マルチタスク機能は、センサ情報の処理、システムの制御、異常処理、他システムとの通信など多くの処理を同時に行なうために必要な機能である。マルチタスク処理においては、タスクとして実行される個々の処理に対して優先度を設定し、イベントの発生によりタスクの優先度を上げるタスク方式や、タスクごとにCPUの占有時間を割り当てるタイムスライス方式がある。いずれにせよ、シングルタスクシステムに比べCPUを有効に利用でき、異常など定期的に処理できない事象に対して即座に対応できるシステムを構築できる。また実際のスケジューリングは、OSによって行なわれるためプログラム開発においてタスクスケジューリングを意識する必要がない利点もある。

6.4.2 ハードウェア

本システムではVMEバスを採用し、CPUボードにはモトローラ社製のMVME167Sを使用している(図6.18)。CPUは68040でありクロックは50MHz、メモリを16Mbyteもっている。ネットワーク機能を実現するためにMVME712MとMVME147P2アダプターボードを使用し、これによってローカルエリアネットワークに接続されている。

加工機械を外部から制御するために、パルス・ジェネレータボードとパラレルI/Oボード(株式会社アパールデータ製TVME-342)を使用している。パルス・ジェネレータボードは著者が所属する研究室において製作したものであるが汎用のパルス・ジェネレータボードで問題はない。これにより2相のパルスを発生し3軸方向の工具の移動量および速度の設定を行なっている。また主軸回転の停止、起動および主軸回転数の設定、主軸回転数の検出、機械異常信号の検出をパラレルI/Oボードを通して行なっている。

力センサにおける歪ゲージの出力は、歪増幅器によって増幅されたあと、A/D変換ボード(インターニクス株式会社製PVME-301)によりアナログ信号をディジタル信号に変換して制御器内に取り込んでいる。変換は12ビットで行ないチャンネル数は32チャンネルである。変換速度は6チャンネル同時変換で最大で8kHzである。

工具の位置を検出するために、マシニング・センタにマグネスケールが搭載されている。工具が移動するときにマグネスケールが発生する2相のパルスをカウントすることによって工具の位置を検出することができる。パルスをカウントするためにカウンタボード(ハイシステムコントロール株式会社製HIMV-606A)を使用している。これは24ビット長のカウンタを3チャンネルもっている。

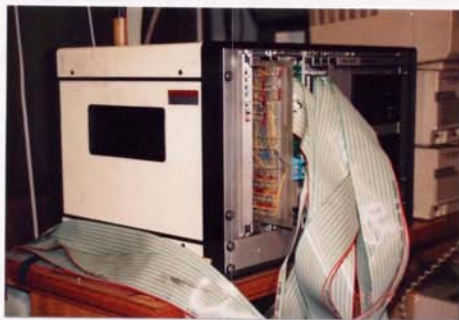


図 6.18 実時間制御器の概観

6.4.3 オペレーティングシステム

本システムでは、リアルタイム・マルチタスク・オペレーティングシステムとして Wind River Systems, Inc. が開発した VxWorks を使用している。VxWorks がもつ主な機能として、

1. リアルタイム・オペレーティング機能

優先度スケジューリングのマルチタスク機能、タスク間の同期および通信機能、割込み処理のサポート、ウォッチドッグタイマ、メモリ管理機能。

2. ネットワーク機能

BSD UNIX とソース互換のソケットを介して、他の VxWorks システムや UNIX システムに対する透過的なアクセスを提供。

3. I/O システム

UNIX 標準のバッファド I/O を含むソース互換の高速で柔軟な I/O システム。

4. リモートファイルシステム

ネットワーク上の NFS(Network File System) サーバで透過的なアクセスを行なうネットワークファイルシステム機能と rsh または ftp を使用してホストのファイルシステムをアクセスする非 NFS の機能。

5. デバッグ機能、性能評価ツール

6. ユーティリティライブラリ

などがある。このなかで特に、リアルタイム・オペレーティング機能やネットワーク機能は、生産システムの中で必須の機能であり VxWorks はこれを満たしている。また、確立した計算モジュール、例えば力ベクトルの軌跡の種々の計算などは ROM 化することが可能であり、ソフトウェアライブラリの生産性が非常に良くなっている。

第7章

自律型加工機械の実現

7.1 自律型加工機械のシステム構成

自律型加工機械のシステム構成を図7.1に示す[126, 127, 128]。製品形状の入力は3次元CAD/CAMの上で行なわれ、工具経路が生成される。使用したCAD/CAMはパラメトリック・モデリングの機能をもち、加工結果や機能評価結果により寸法を修正する必要がある場合、修正を容易に行なうことができる。製品形状は加工状態に影響を与える要素の一つである。製品形状によって工具経路は拘束されている。特に仕上げ加工においては、ほとんど製品形状どおりに工具は移動する。そのため製品形状の情報から加工条件の変化を生み出す特徴形状を抽出することは加工条件を決定するために重要である。

加工条件は、抽出された形状情報と加工に関するデータベースに基づき初期値として設定される。決定された加工条件が種々の拘束条件を満たしているかを、加工の物理モデルと工具および工作物に関するデータベースを用いてあらかじめチェックしておく。この段階で問題がある場合は、拘束条件を満たすように修正される。

一方、加工する形状によって加工中の制御手法が異なる。角部の加工では急激なびびりが発生するために、角部にさしかかる手前で送り速度および主軸回転数を減速する必要がある。また薄肉部の加工においては、5.3で示したように加工現象が非常に特殊であるため、その現象を考慮した制御(例えば変速切削法)を実行する必要がある。このように加工条件修正制御は製品形状に大きく依存するものであり、適切な制御をあらかじめプランニングしておく必要がある。

こうして生成された加工情報は加工機械を制御する実時間制御器に送られ、加工機械の動作を制御する。加工機械においては多軸力センサによって切削力が力検出部の歪として検出され増幅器によって増幅した後、実時間制御器に送られ6軸力に変換される。獲得した6軸力から実時間加工状態判定法に基づき、力ベクトルの軌跡に関するパラメータを計算する。切削力、ベクトル軌跡の重心、分散を物理モデルによる予測値と比較することにより加工状態を判定する(加工状態の自己判定)。

判定された加工状態に応じて加工条件として送り速度および主軸回転速度を修正し、加工機械の動作にフィードバックをかける。このフィードバック・ループにより常に加工状態を良好に保ちながら、加工条件の自己修正が行なわれ、最適な加工条件を見つけ出す(加工条件の自己修正)。

また製品形状の加工中に行なった修正過程および結果は最終的に加工に関する知識として5.2で示した手法により整理、蓄積され、その後の加工条件決定の際に加工機械の経験として参照される(加工条件の学習)。

工具や工作物の材質によっては、加工に関する物理モデルのパラメータを知識として持っていない場合がある。また加工経験が十分でない場合には加工条件と加工結果に関するデータベースが不十分で、デフォルトとして持っている加工条件で加工を行なう必要がある。こうした場合に熟練者が行なうように、加工機械は学習モードに入り、試し削りを行なう。物理モデルのパラメータについては、パラメータを決定するために必要な力データを獲得し第3章で示した計算を実行する。また経験したことのない加工条件を与えられた場合にも試し削りを実行し、加工状態判定法によって良好な加工状態が実現できるかを確認するとともに知識として蓄積する。

図7.2は実時間制御器内で動作しているタスクを示す。CL data-based MC control task は、CAD/CAM によって生成された CL データを外部制御用の命令に変換し、マシニング・センタを駆動する。Sensor information acquisition task はタイム割り込みにより定期的に動作し、歪情報を力情報に変換して蓄積する。Machining state detection task は、工具1回転分の力情報が蓄積されるごとに動作し、力ベクトルの軌跡に関するパラメータである、重心、重心から各点までの距離および距離の分散を計算し加工状態を判定する。Machining condition modification task は、加工状態判定タスクで判定された加工状態を受けて、加工の規則を用いて加工条件を修正量を計算し工作機械の動作にフィードバックをかける。User Interface は、工作機械の動作状況と現在の加工状態に関する情報をそれぞれ CL data-based MC control task と Sensor information acquisition task より受けとり実時間でユーザに伝える。

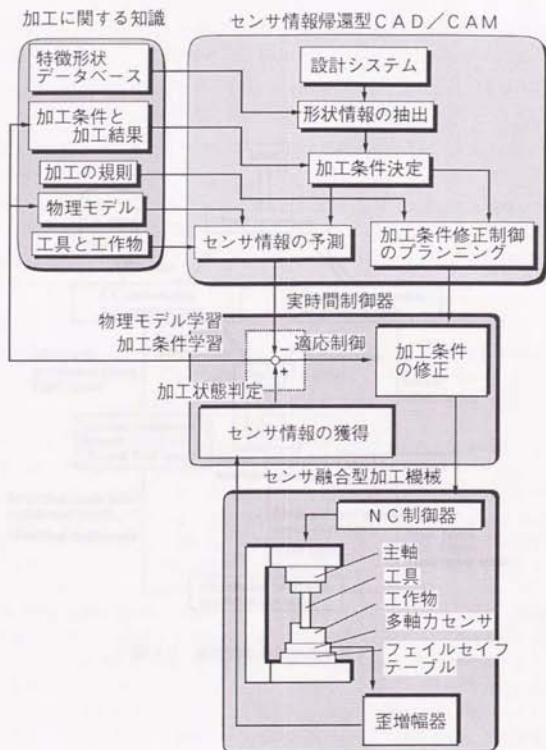


図 7.1 自律型加工機械のシステム構成

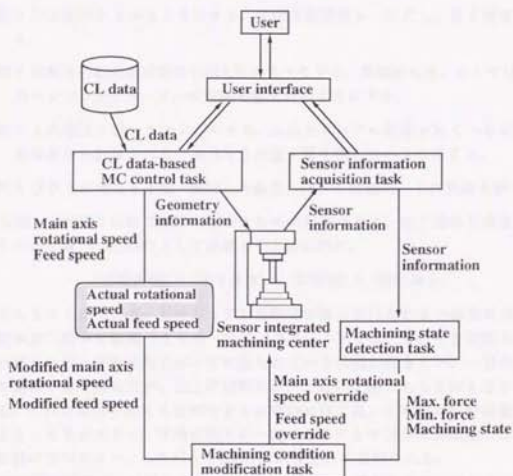


図 7.2 実時間制御器内のタスク

7.2 加工条件の修正規則

多軸力センサから獲得した多軸力情報より実時間で加工状態を判定したあと、この結果にしたがって以下の規則にしたがって加工条件を修正していく。

規則1 加工時間が短くなるようにする。主軸回転速度を上げ、送り速度を一刃当たりの送り量が一定となるように制御する。

規則2 加工効率が上がるようにする。主軸回転速度を一定にし、送り速度を上げる。

規則3 切削力の絶対値が定格を越えないようにする。具体的には、ここでは、6軸力センシング・テーブルの定格を越えないようにする。

規則4 工具強度を越えないようにする。工具カタログに記載されている切削条件基準表から計算される一刃当たりの送り量を越えないようにする。

規則5 びびりの発生を予知・検知した場合、びびり抑制モードに制御を移す。

規則1と規則2は加工効率を上げるための規則である。加工効率を単位時間あたりの切削量(切削体積)として定義すると近似的に、

$$(\text{切削体積}) = (\text{送り速度}) \times (\text{切削幅}) \times (\text{切削深さ})$$

と考えることができる。したがって工具経路の修正を行わない場合には、送り速度が加工効率を制御できる唯一つのパラメータとなる。このとき切削力の観点から考えれば、平均切削力が一定に保たれている状態が好ましい。一刃あたりの送り量が一定である方が、仕上げ切削においては加工面のむらを抑えることができる。これは幾何学的にも証明できるが実際には工具・工作物の相対位置の変動によるものが大きく、平均切削力が一定であることやびびりが発生しないことの影響の方が大きい。したがって[規則1]が優先的に適用される。

主軸回転速度を上げることによって加工効率を上げることができるが、実際には切削速度が上がるために工具摩耗の進行速度を速めてしまう。本論文では工具摩耗については考慮していない。しかしながら工具摩耗と切削速度に関する関係を知識として持っていれば、これによって切削速度の上限値、すなわち主軸回転速度の上限値を与えることになる。この場合には規則の適用が、[規則1]から[規則2]に代わるだけである。本実験においては主軸回転速度の上限値は、工作機械の最大主軸回転速度として記述されている。

主軸回転数や送り速度を修正する場合、ゲインをどのように設定するかは一つの問題であると同時に、制御の目的関数をどのように定めるかという制御戦略に

よって異なる。本システムでは、4.3.1で示したように、力ベクトルの軌跡の分散値が振動状態の程度を表していることを利用する。すなわち、制御のゲイン K を

$$K \propto \{(\text{分散値の閾値}) - (\text{現在の分散値})\} \quad (7.1)$$

のように分散の閾値と現在の分散値の差に比例させる。

またびり制御モードでも、上記の計算にしたがってゲインが決定されるが、比例係数を正常状態のときのそれよりも大きく設定している。またびり制御においても、[規則3]、[規則4]は適用される。

7.3 加工条件の自己学習機能

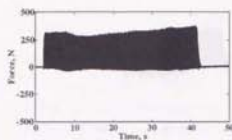
加工条件の自己学習機能の適用例を示す。

スクエアエンドミル $\phi 10$ および $\phi 15$ の2本の工具(表 7.1)についてデータベースにない加工条件を初期値として与えた。ここでは与えられた工具と切削深さに対して、加工状態を正常に保ちながら加工できる条件を学習する。加工状態判定のための分散の閾値を 5000 N^2 に設定した。

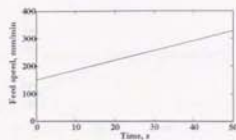
図 7.3は $\phi 10$ のエンドミルで切削深さ 6.5 mm の条件を与え学習を行なわれた時の切削力、送り速度、主軸回転数および分散値の経時変化である。加工を開始してから加工状態が安定である(分散値が設定した閾値以下である)ので、規則1にしたがって、一刃あたりの送り量を一定に保ちながら主軸回転速度および送り速度が上昇していることが分かる。切削開始後42秒後に主軸回転数は上限値である 5000 rpm に達した。ここで適用規則が規則1から規則2に移り、送り速度のみが上昇していることが分かる。この実験においては加工状態は常に正常であり、びびり制御は行なわれなかった。この結果は、5.2.3の図 5.4の(d)の結果と一致している。

図 7.4は $\phi 15$ のエンドミルで切削深さ 13 mm の条件を与え学習を行なわれた時の切削力、送り速度、主軸回転数および分散値の経時変化である。加工を開始してから27秒までは加工状態が正常であり、規則1が適用され送り速度、主軸回転数とも上昇している。しかしその後分散値が 5000 N^2 を越えびびり振動を検知し、びびり振動抑制制御が働き、主軸回転数および送り速度が下がっているのが分かる。主軸回転数および送り速度を下げることによってびびり振動が回避されると、制御がびびり制御から規則1の適用に移るので、再び主軸回転数と送り速度が上がっている。この繰り返し为主軸回転数、送り速度のグラフにおける鋸刃状の様子に現れており、分散値のグラフで複数のピークが存在している理由である。

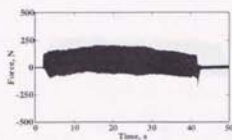
この実験において、 $\phi 15$ のスクエアエンドミルで切削深さ 13 mm で溝切削を行なうと、送り速度が 182 mm/min 、主軸回転数が 2700 rpm 付近でびびり振動が発生することが分かる。すなわち加工機械が加工条件を自己修正し、予備実験の加工において送り速度が 182 mm/min 、主軸回転速度が 2700 rpm の条件で加工を行なうのが適当であるという知識を得ることができた。この結果は5.2.3の図 5.4の(e)の結果と一致している。



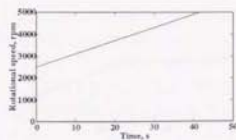
(a) x 軸方向の切削力



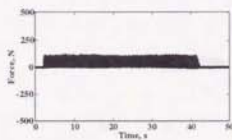
(d) 送り速度



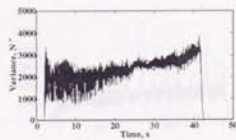
(b) y 軸方向の切削力



(e) 主軸回転数



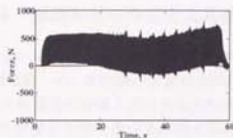
(c) z 軸方向の切削力



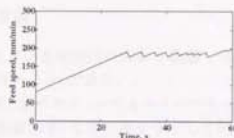
(f) 分散値

工具	: スクエアエンドミル $\phi 10$ 2 枚刃	初期送り速度	: 150 mm/min
工作物材質	: A2017	初期主軸回転数	: 2500 rpm
切削幅	: 7 mm	測定周波数	: 2 kHz
切削深さ	: 6.5 mm	分散値閾値	: 5000 N^2

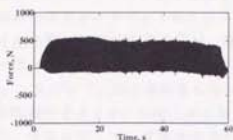
図 7.3 $\phi 10$ での加工条件自己学習実験結果



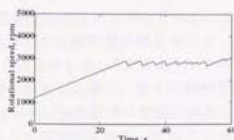
(a) x 軸方向の切削力



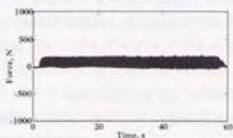
(d) 送り速度



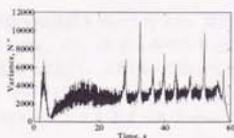
(b) y 軸方向の切削力



(e) 主軸回転数



(c) z 軸方向の切削力



(f) 分散値

工具	: スクエアエンドミル $\phi 15$ 2 枚刃	初期送り速度	: 80 mm/min
工作物材質	: A2017	初期主軸回転数	: 1200 rpm
切削幅	: 15 mm (溝切削)	測定周波数	: 2 kHz
切削深さ	: 13 mm	分散値閾値	: 5000 N ²

図 7.4 $\phi 15$ での切削条件自己学習実験結果

7.4 部品形状の作成と工具経路の生成

加工する部品は、航空機などで用いられている補強用の部材を模倣したものである(図7.6)。工作物の材質はA2017(ジュラルミン)である。

この部品の形状入力にあたっては、2.3.4で述べたフィーチャー・ベース・モデリングの設計思想に基づき、単に部品形状(最終形状)を線の集まりとして記述するのではなく、素材形状から切削除去される部分を定義している。具体的には、まず図7.6の形状を作成し、各寸法値および面情報を属性とし、工作物から論理差をとるようにフィーチャーとして定義する。これは、CAD/CAMシステムにすでに定義済みの長方形のポケットおよびスロットを拡張したものとなっている。さらに、各寸法の間には制約条件を設け、最終形状としては薄肉部の厚さやスロットの幅をパラメータとして全体の設計変更が行えるようにした(パラメトリックモデリング)。したがって、加工後になんらかの問題が発生した場合、例えば剛性不足で加工が無理であるとか、出来上がったもののイメージが設計者の意図と異なっていた場合、寸法に対しての変更を容易に行なうことが可能となる。このことは、設計者がマニュアルによって直接工作機械を操作して、寸法を修正した場合に、その結果にしたがってCAD/CAM上での形状の変更が自動的にかつ容易に行なわれることという意味でも非常に重要である。

工具経路は使用したCAD/CAMの工具経路生成機能を用いて行った。使用可能な工具はアルミ用スクエアエンドミルで、 $\phi 15$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 5$ の4本である(表7.1)。

まず始めに、最大径の $\phi 15$ の工具を用い領域AREA1、AREA2に対して2mmのストックでLace Cuttingを、0.5mmのストックでContouring Cutを行なう。続いて領域AREA3に対して、最終的に0.5mmのストックとなるようにPocket Cuttingを施す(図7.7)。

次に、 $\phi 10$ の工具を用いてSlot1およびSlot2を切削する。この場合、粗加工では切削深さを6.5mmとし、深さ方向に対し2回に分けて切削を行う。その後同じ工具により一工程で仕上げ加工を行うが、側面・底面とも0.5mmずつの切り込みで切削を行う(図7.8)。

最後に、 $\phi 8$ の工具でAREA1、AREA2、AREA3に対し仕上げ加工を行う。工具の候補としては $\phi 8$ 、 $\phi 5$ の2種類があるが、 $\phi 5$ の工具では刃長が13.5mm以下であるため、 $\phi 8$ を用いることになる。側面・底面とも切り込みは0.5mmである(図7.9)。

なお、本システムで用いたCAD/CAMには作成したカッターパスによって加工のシミュレーションが行え、視覚的にカッターパスの確認と加工の様子を知ることができる(図7.10)。

生成したカッターパスに対して、CAD/CAMはCLFile(Cutter Location File)を出力する。これをポスト処理することによってAPT(Automatically Programmed Tools)で記述されたNCデータを生成する。しかしながら本システムにおいては、実時間で加工状態を監視しながらその結果にしたがって加工条件(送り速度、主軸回転速度)を修正するため、汎用のAPT言語で記述されたプログラムは適さない。そのためすでに6.1で述べたように外部制御によって加工条件修正機能を実現している。実時間制御器はCAD/CAMによって生成されたNCデータをネットワークを介して受けとり、これを外部制御用の命令に解釈しなおしマシニング・センタの動作を制御している。さらにNCデータには、加工の物理モデルに基づく加工条件の修正において必要な情報として、加工の形状情報として切り込み深さと切削幅の情報が付加されている。加工の形状情報が付加されたため、加工力を予測したり加工状態を判定することが可能となっている。

加工条件は、加工の知識を参照することによって決定される。実験では、まず加工の経験を持たない状態を考えており、その場合加工条件を決定するための知識には、工具カタログに掲載されている加工条件の推奨値が入っている。すでに述べてきたように、一般にはこうした推奨値によって必ずしも効率の良い加工が実現されるとは限らず、加工の経験を持つことによってこの知識が更新されてゆく。



図 7.5 使用した工具

表 7.1 使用可能な工具

工具径	全長	刃長	柄径	ねじれ角(°)	すくい角(°)
5	60	10	8	40	12
8	60	14	10	40	14
10	70	18	10	40	14
15	95	30	16	40	16

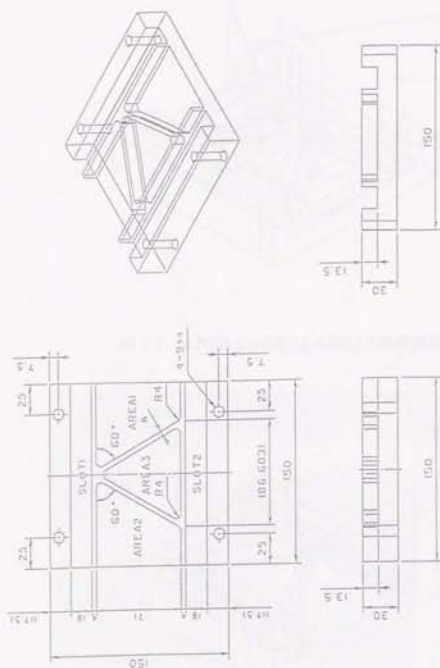


図 7.6 工作物の形状

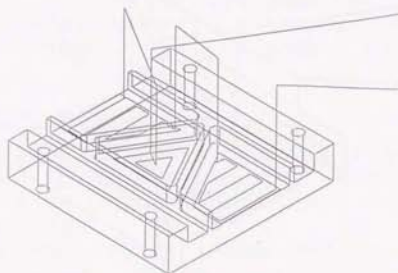


図 7.7 AREA1, AREA2, AREA3 の粗加工

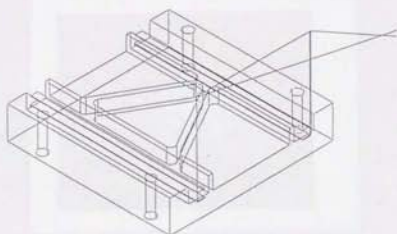


図 7.8 SLOT1, SLOT2 の粗加工および仕上げ加工

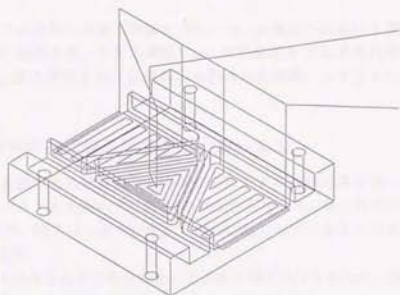


図 7.9 AREA1, AREA2, AREA3 の仕上げ加工

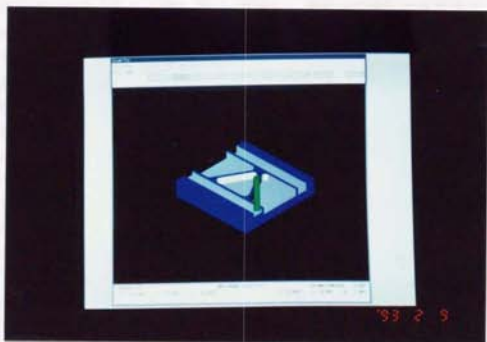


図 7.10 加工のシミュレーション

7.5 自律加工実験

構築したシステムを用いて加工実験を行なった。各機能の有効性を確認するため、(i) 通常のNC装置を使った加工実験、(ii) 形状情報を与えずに自律加工を行なった実験、(iii) 形状情報を与え自律加工を行なった実験、の3通りの実験を行なった。

7.5.1 加工条件の自己修正機能を用いない加工

ここでは比較実験のため通常のマシニング・センタの機能のみを用いて、すなわち7.1で示したシステムを用いずに図7.6の加工を行なった。各工具に対する加工条件を表7.2に示す。図7.11～図7.13に加工中の切削力と力ベクトルの軌跡の分散値の経時変化を示す。

荒加工に関してはほとんどの部分において正常な加工が行なわれた。図7.11は、図7.6のArealのLace Cutによる荒加工の場合の3軸力と力ベクトルの軌跡の分散値を表している。切削力が急変している部分(50秒, 90秒, 135秒, 190秒あたり)は、工具経路の方向が変化しているために切削力の方向が反転していることを表している。工具経路の方向が変化する時に力ベクトルの軌跡の分散値が一時的に増大する様子が観察される。これは工具経路の方向が変化することによって、一時的に切削幅が変化するためである。一般に切削幅が時間変化する状況においては切削過程が不安定になることが経験的に知られていて、このことが分散値により確認することができる。加工開始から38秒あたりまでのパスはArealを一番最初に切削するところで、他のパスに比べて切削幅が広いため、加工力および分散値が比較的大きくなっている。しかし、全体として分散値は低い値を示しており加工状態は安定している。このことは逆に考えれば、設定した加工条件に余裕がありさらに加工効率の向上を期待できることを表している。

図7.12は、図7.6のSlot1の荒加工の場合の3軸力と力ベクトルの軌跡の分散値を表している。この場合には、スロットの行きと帰りの2パスで加工を行なっているが、1パス目が終了して抜けるときおよび2パス目が始まる時に分散値にピークが観察される。これは工具が工作物から離脱する時や工具が工作物に進入するときに加工状態が不安定になり易いという現象を表している。行きは溝切削であるが帰りは切削幅7mmの肩切削であるので、行きよりも帰りの方が分散値が低い値を示している。全体としては安定した加工が行なわれている。

図7.17は、図7.6のArea3の側面の仕上げ加工の場合の3軸力と力ベクトルの軌跡の分散値を表している。この切削で特徴的なことは、21秒後、61秒後、101秒

後において切削力に鋭いピークが見られることである。これはがケットの3箇所
の角部の加工において発生したもので、びびり振動が発生している。このことは分
散値のグラフにおいても確認することができる。角部は $\phi 15$ のエンドミルによって
荒加工において作られたものでR7.5で中心角が 60° である。これに対して $\phi 8$ の
エンドミルによって仕上げ加工を施す。そのため幾何学的に考えると、 $\phi 8$ のエ
ンドミルが角部にさしかかると切削幅が急激に増加することになる。



表 7.2 自己修正機能なしの実験での切削条件

工具径 (mm)	回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	1刃当りの送り (mm/刃)
$\phi 15$	1200	80	0.033
$\phi 10$	2500	100	0.02
$\phi 8$	2000	100	0.025

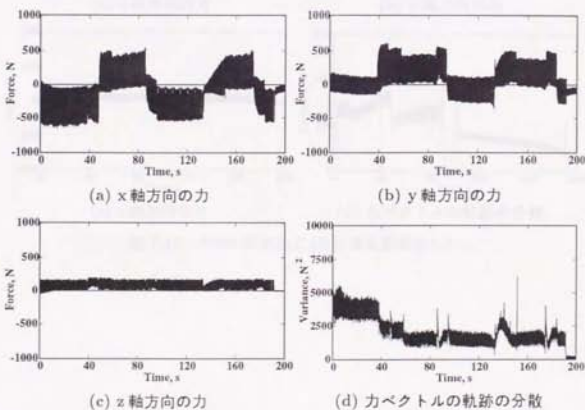


図 7.11 Areal の Lace Cut による荒加工 (自己修正機能なし)

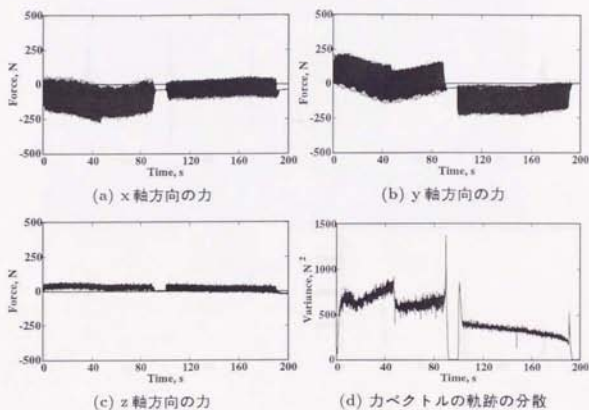


図 7.12 Slot1 の荒加工 (自己修正機能なし)

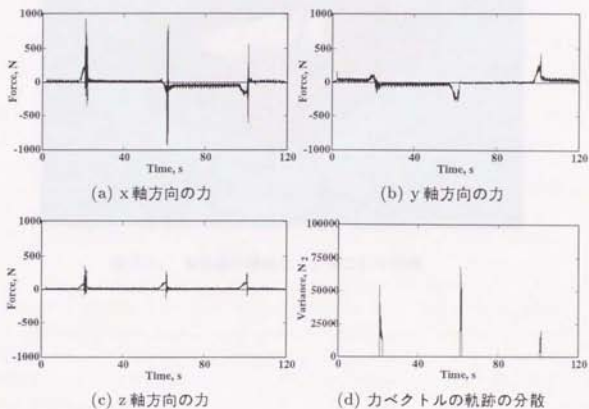


図 7.13 Area3 の側面切削 (仕上げ加工) (自己修正機能なし)

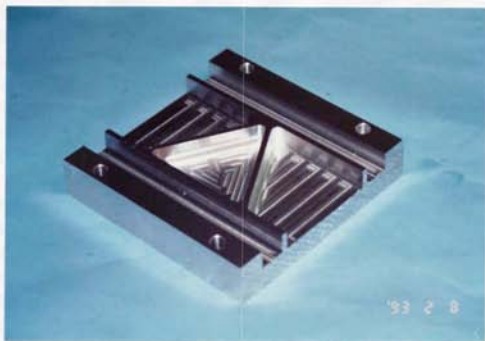


図 7.14 自己修正機能なしで加工した部品

7.5.2 多軸力情報を用いた自律加工実験

次に7.1で示したシステムを用い加工条件の自己修正機能を適用して加工を行った。加工条件の初期設定値は表7.2と同じとした。加工条件修正規則は、7.2で示した規則を適用した。力ベクトルの軌跡の分散についてびり発生を検知するための閾値を、荒加工においては 5000N^2 、仕上げ加工においては 800N^2 に設定した。すなわち分散がこの値を越えたとびり抑制制御が行なわれる。

図7.15～図7.17に3軸力、主軸回転数、送り速度および分散値の経時変化を示す。図7.15はArealのLace Cutによる荒加工、図7.16はSlot1の溝切削、図7.17はArea3の側面の仕上げ加工におけるデータである。

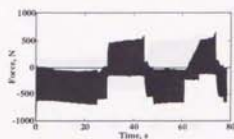
図7.15を自己修正機能を用いなかった場合の図7.11のデータと比較しながら考察する。適用された規則は[規則1]で、一刃あたりの送り量が一定となるように送り速度と主軸回転数を上げている。そのため図7.11の3軸力と図7.15の3軸力とを比較するとほぼ同じ切削力が生じている。また同様の理由により加工中は合成切削力がほぼ一定に保たれている。切削開始から30秒後、45秒後および62秒後に行なわれたびり振動抑制は、工具経路ベクトルが変化する時に発生する不安定な加工状態を検知して行なわれたものである。一方37秒後から45秒後までの約8秒間に渡って行なわれたびり振動抑制は次のように説明できる。7.3で行なった加工条件の自己学習実験のうちφ15の工具で溝切削した図7.4のグラフや例えば5.2.3の図5.9を見ると分かるように、実験で使用している加工システム系(マシニング・センタ、工具、6分力テーブル)では、切削深さが13mmのとき2500rpm～3000rpmでは不安定領域に入る。そのためこの加工実験においてもこの主軸回転数に近づいた時びり振動が発生した。この状態は切削幅が変わらない間、すなわち工具経路ベクトルの方向が変化しない間持続したが、工具経路ベクトルが変更して切削幅や切削方向が変化したときに、安定状態に変わった。そのため再び[規則1]による制御が始まった。

図7.16では、切削開始から40秒後までは[規則1]が適用され、送り速度と主軸回転数が上昇している。40秒後に主軸回転数が上限値に達したため、[規則2]が適用されて送り速度だけが制御され上昇している。この加工ではびり振動が発生するような不安定な状態にはならなかった。これは5.2.3の図5.4の(d)において、切削深さが6.5mmの場合、主軸回転数を上げて不安定領域を横切ることがないことから予測できる。

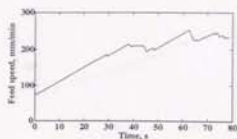
一刃あたりの送り量が時間とともに変化するため、条件によっては不安定となる可能性はあるが、その場合はもちろんびり振動が検知され、びり振動抑制制御に移り主軸回転数と送り速度が下げられることになるであろう。

図7.17では、分散値が閾値を越えたところでびびりを検知しびびり抑制制御が働いているが、切削力や分散値を見ると制御が十分でないことが分かる。分散値を比較すると、びびり発生時には、加工条件修正制御を行なわなかった図7.13よりも分散値が大きくなっていることが分かる。これは、工具が角部に向かって加速しているために切削幅の時間的変化がさらに大きくなったためと考えられる。

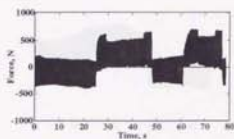




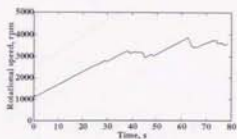
(a) x 軸方向の切削力



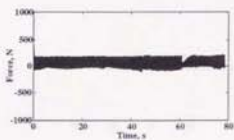
(d) 送り速度



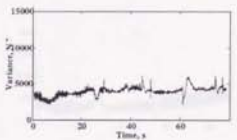
(b) y 軸方向の切削力



(e) 主軸回転数



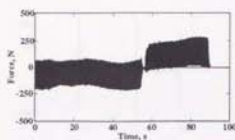
(c) z 軸方向の切削力



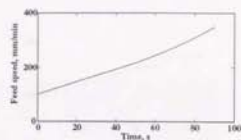
(f) 分散値

工具	: スクエアエンドミル $\phi 15.2$ 枚刃	初期送り速度	: 80 mm/min
工作物材質	: A2017	初期主軸回転数	: 1200 rpm
切削幅	: 15 mm (溝切削)	測定周波数	: 2 kHz
切削深さ	: 13 mm	分散値閾値	: 5000 N^2

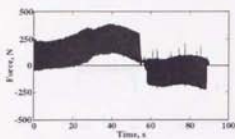
図 7.15 Areal の Lace Cut による荒加工 (自己修正機能あり)



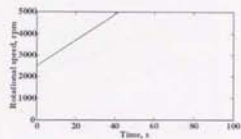
(a) x軸方向の切削力



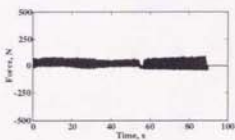
(d) 送り速度



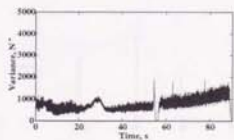
(b) y軸方向の切削力



(e) 主軸回転数



(c) z軸方向の切削力



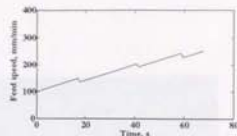
(f) 分散値

工具	: スクエアエンドミル $\phi 10$ 2枚刃	初期送り速度	: 100 mm/min
工作物材質	: A2017	初期主軸回転数	: 2500 rpm
切削幅	: 10 mm (溝切削)	測定周波数	: 2 kHz
切削深さ	: 6.5 mm	分散値閾値	: 5000 N ²

図 7.16 Slot1の荒加工 (自己修正機能あり)



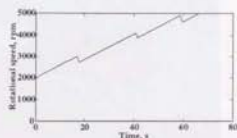
(a) x 軸方向の切削力



(d) 送り速度



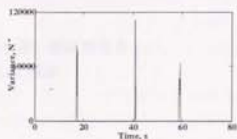
(b) y 軸方向の切削力



(e) 主軸回転数



(c) z 軸方向の切削力



(f) 分散値

工具	: スクエアエンドミル $\phi 8$ 2 枚刃	初期送り速度	: 100 mm/min
工作物材質	: A2017	初期主軸回転数	: 1200 rpm
切削幅	: 0.5 mm (溝切削)	測定周波数	: 2 kHz
切削深さ	: 13 mm	分散値閾値	: 800 N ²

図 7.17 Area3 の側面加工 (仕上げ加工) (自己修正機能あり)

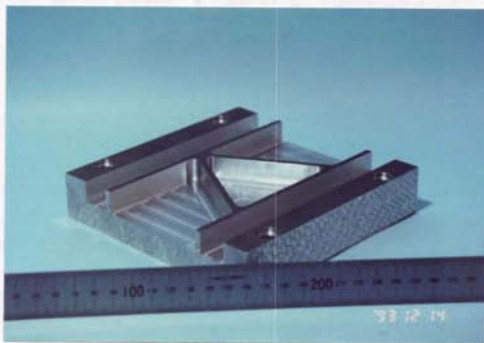


図 7.18 多軸力情報を用い形状情報を用いず加工した部品

7.5.3 多軸力情報と形状情報を用いた自律加工実験

最後に7.1に示したシステムのすべての機能を用いて自律加工実験を行なった。ここでは、図7.19に示す形状の部品を加工した。左右対象の形状を有し、それぞれ深さ13mm、8mm、4mmのオープンポケットがある。角部は中心角60°と120°のものが1つずつある。加工順序は、

1. まず片側のポケットを深さ13mm、8mm、4mmの順に荒加工し、
2. 次にもう片側のポケットを同様に荒加工する。仕上げ加工は側面のみ行ない、
3. まず片側のポケットの側面を深さ13mm、8mm、4mmの順に仕上げ、
4. 最後にもう片側のポケットを同様に仕上げる。

5.2.3の実験的安定限界線図で分かるように、切削深さと主軸回転数、さらには工具の摩耗具合によって安定した加工状態を実現する加工条件の組合せは非常に異なっている。そこで、切削深さを3通りにとれる形状に変更した。そして工具については、新品のものを使用した。実験条件を表7.3に示す。

図7.20は最初に加工した13mmのポケットの荒加工、図7.21は2番目に加工した13mmのポケットの荒加工、図7.22は最初に加工した13mmのポケットの仕上げ加工、図7.23は2番目に加工した13mmのポケットの仕上げ加工の送り速度、主軸回転数、分散の経時変化であり、分散については閾値付近を拡大したものも載せている。

図7.20は工具が新品の状態での切削した場合である。一般に新品の工具はびびり易いため、最初の30秒間は送り速度、主軸回転数とも最も低い設定で加工を行っている。初期摩耗が進行して工具の状態が次第に良くなるにつれて、分散値が下がって閾値よりも小さくなると、加工条件修正機能が働き少しずつ送り速度と主軸回転数が上がっている様子が分かる。

125秒後と175秒後に送り速度と主軸回転数が急激に減速しているのは、工具の送り方向が急激に変化(120°方向転換)することを形状情報として認識した結果制御されたものである。これは形状情報により加工状態が悪化することを予測して制御したものであるが、実際の加工状態が良好であることを認識すると、すぐに加工条件を修正している様子が分かる。

(d)を見ると、分散値が閾値を境に大きく振動していることが分かる。これは工具の状態がまだ不安定であるために、送り速度、主軸回転数を上げようとするとすぐに加工状態が不安定になり、送り速度と主軸回転数を下げるとすぐに加工状態が安定になる、という2つの状態を繰り返しているためである。

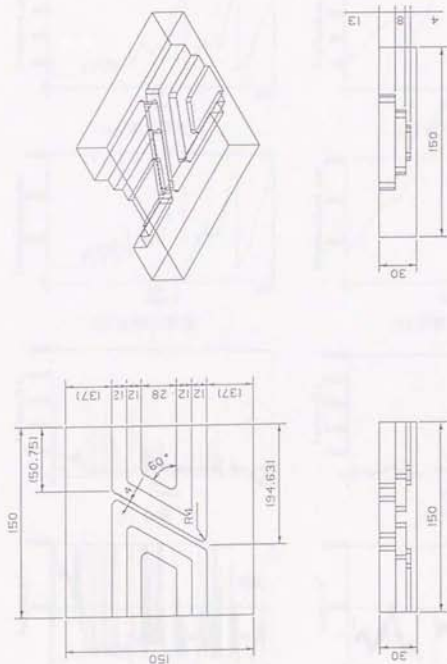
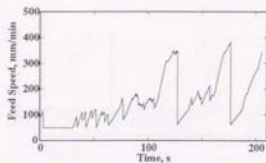
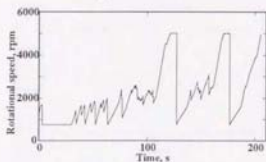


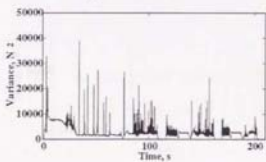
図 7.19 工作物の形状



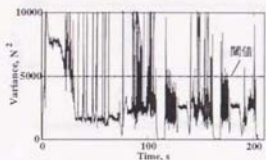
(a) 送り速度



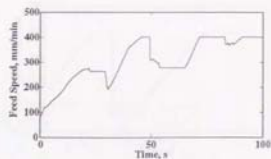
(b) 主軸回転数



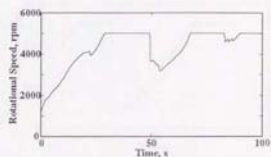
(c) 分散



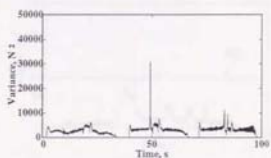
(d) 分散の閾値付近の拡大図

図 7.20 深さ 13mm のポケットの
荒加工時 (最初)

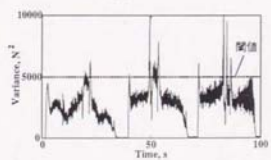
(a) 送り速度



(b) 主軸回転数

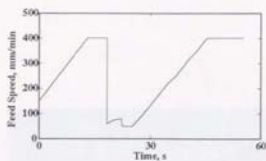


(c) 分散

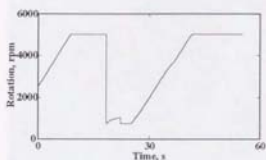


(d) 分散の閾値付近の拡大図

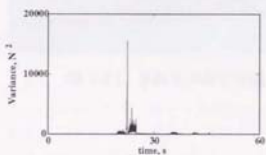
図 7.21 深さ 13mm のポケットの
荒加工時 (2 番目)



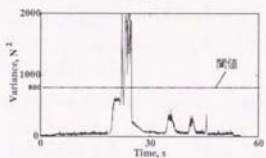
(a) 送り速度



(b) 主軸回転数

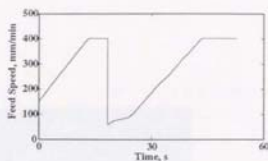


(c) 分散

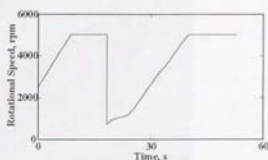


(d) 分散の閾値付近の拡大図

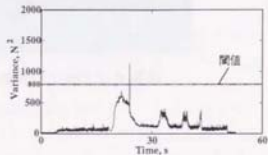
図 7.22 深さ 13mm のポケットの仕上げ加工時 (最初)



(a) 送り速度



(b) 主軸回転数



(c) 分散



図 7.23 深さ 13mm のポケットの仕上げ加工時 (2 番目)

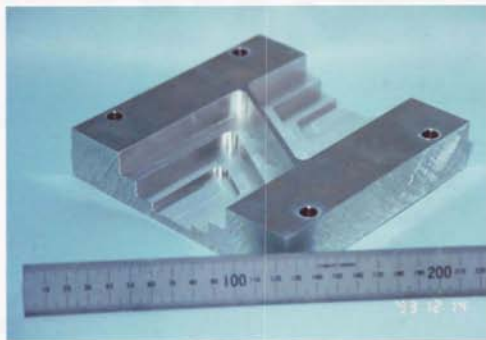


図 7.24 多軸力情報と形状情報を用いて加工した部品

7.6 考察

本実験により次のことが言える。

- (a) 加工時間について 加工が正常であると判定されている間は、主軸回転速度と送り速度を増加させる、という加工条件修正規則によって加工状態を正常に保ちながら加工時間を短縮することに成功した。今回の実験においては、加工条件の自己修正機能を用いない場合の正味切削時間70分が、44分(64%)に短縮された。
- (b) 加工精度について [規則1]は一刀あたりの送り量が一定となるように送り速度と主軸回転数を制御するため、制御したにも関わらず発生する切削力は変化しなかった。荒加工においては最終形状の精度に影響を及ぼすことはもちろん起こらなかった。仕上げ加工においても表面粗さや寸法精度に関して制御をした場合とそうでない場合との間に違いは見られなかった。今回の実験では確認されなかったが、もし仕上げ加工において[規則2]の適用によって表面粗さや寸法精度が得られない場合には、加工の規則として仕上げ加工の場合の[規則2]の適用を抑制すれば問題はない。
- (c) びびり振動の抑制制御について 荒加工においては、びびり振動の発生を抑制しながら、すなわち正常加工状態を保ちながら、より効率的な加工条件へ修正を行なうことができた。しかし、今回の実験で扱った部品形状モデルのArea3の角部においては、びびり振動を完全には回避できなかった。角部においては他の部分に比べて切削幅の変化が大きい。そのためびびり振動が急激に発達するので、びびり振動の初期段階で検知が行なわれているにもかかわらず、振動抑制の効果を得ることができなかった。部品形状に関する幾何学的モデルと加工に関する物理モデルを用いることによって、切削力の急激な増大を予測することによって、そのような場所では制御タスクを切替えるような手法が必要である。
- (d) 制御について 今回の実験により実時間で加工条件を修正制御する手法の有効性を確認することができた。しかしながら今回の実験では送り速度や主軸回転数の制御量を一定として行なったが、この制御量をどう設定するかが別の問題として出てくる。理論的に扱うとすると切削機構の問題と非常に関連するため、完全に定式化することは現段階では難しいと思われる。本研究の主旨から考えるとやはり、実時間で加工状態を認識し、その加工状態の変化に応じて制御量を柔軟に決定することが重要と思われる。すなわち制御量の学

習を加工中に行なって技量を上げていく手法がよいと思われる。

- (e) 経験学習機能の可能性について 5.2.3で議論した実験的安定限界線図の実験では、安定限界線図を獲得するための実験を特別に行なったものであるが、その結果と今回の部品加工実験での加工状態との間に相違ない結果が得られた。このことは、通常の部品加工時において加工条件を自律的に修正していく中で単に修正するだけでなくその結果を取り込んでいけば、加工経験を得ることができ、効率良く知識を獲得できることを示唆している。
- (f) 多軸力情報と形状情報の関係について 実験で示されたように形状情報を利用することによって、角部のびびりを回避することができた。このことは本論文の基本概念の一つである「現象の予測」「情報のフィードフォワード」を行なっていることを意味する。加工現象は加工条件だけでなく加工対象の形状に依存する。全く同じ加工条件であっても対象が薄肉梁であるか剛な工作物であるかで発生する現象が異なる。そのため多軸力情報を予測するために形状情報は必要であると考えられる。この場合に与えられる形状情報は単なる幾何学的な意味であるよりずっと多軸力情報に密接な形で提供される必要がある。

第 8 章

総括と展望

多品種少量生産あるいは変種変量生産や一品種一品生産の傾向、生産過程におけるリードタイムの短縮、製造期間の短縮、製品の短寿命化など社会的な背景とニーズに、柔軟に対応できる自動化、無人化生産システムの実現が望まれている。この問題に対して本研究では特に加工工程に着目し、加工機械の知能化あるいは自律化の実現を考えてきた。加工を取り巻く工程について情報の流れ、最終的な加工動作の決定を考察すると、加工の物理現象を捉えることからシステムが構成されることが重要であることが分かった。

そこで、加工現象の中でもっとも本質的な情報の一つである加工力に着目して加工機械システムを構築したのが本研究の「多軸力情報を用いた知能化生産システム」である。知能化加工機械ではなく、知能化生産システムであるのは、加工動作を決定するための加工工程設計部、加工工程を拘束する形状設計部、さらには形状を拘束する機能設計部といった、生産システムを構成する各部門に、加工によって発生する物理現象が影響を与えるためである。

すなわち通常の情報の流れは、要求が出されたあと、機能設計、形状設計、加工工程設計があって、ここでようやく加工条件をいかに決定するかといった加工現象の予測や加工動作の予測が行なわれる。しかしながら加工現象は非常に複雑であり、予測した加工状態が実現されない場合がある。すなわち予測段階で決定した種々の条件をそのまま適用するだけでは、目的を達成することはできない。そのため、加工機械に予測した状態との偏差を求めさせ、加工に関する知識を援用することにより加工条件を変更し良好な加工状態を実現することが重要となる。つまり加工機械の知能化、自律化が生産システムにとって重要な課題となるわけである。

加工機械を知能化、自律化させるためには、

1. 加工機械が加工現象をとらえるためのセンサを有すること、
2. センサ情報をもとにフィードバック・ループを形成し自律的に加工を行なうこと、
3. センサ情報により加工状態を実時間で認識できること、
4. 加工に関する物理モデルを保有し、種々のパラメータをセンサ情報により自動的に決定、更新できること、
5. 定性的な知識に加え、センサ情報と加工に関する物理モデルによって裏付けられた定量的な知識を保有していること、

といった機能、仕組みが必要とされる。

加工現象を捉えるには加工機械に複数のセンサを搭載する必要がある。場合によっては一つの加工現象を複数のセンサによって監視することが必要になるかもしれないが、情報が多くなるにつれて処理や判断が複雑になる恐れがある。本研究で提案する「マルチセンサ融合型加工機械」では、特にマシニング・センタのような複数の加工法が複合化された加工機械においては、加工法や状況によってセンシングする方法や対象が異なるため、それぞれに応じて複数のセンサを有するという考えを基本とする。このような考え方に基づいて複数のセンサを持つことは、一つの製品を材料から最終形状まで仕上げる過程で一連の加工が同一の加工機械によって、同じように知能化されることであり、これにより加工機械が生産システムの中で柔軟性を持つことができると考える。

獲得したセンサ情報、本論文では多軸力情報により加工状態を認識することが可能となるが、その結果を再び自らの動作にフィードバックするためには、加工状態の判定を実時間でこなす必要がある。本論文で提案した「力ベクトルの軌跡による実時間加工状態判定法」は、エンドミル加工のような断続的かつ変動的な切削力の性質の影響を受けることなく、特にびり振動の判定を実時間でこなすことができるが、これは画期的な手法であり意義も大きい。また判定結果が振動状態の善し悪しを定量的な情報として保持している点も重要なポイントである。びりに関する従来のモデルによる予測では、安定か不安定かの2値情報しか与えることができなかったのに対して、加工制御において非常に良く実際の状態を表したものである。制御の目的関数に組み込みやすいものと考えられる。

加工に関する知識として加工条件に関する知識を、加工機械のフィードバック・ループと、力ベクトルの軌跡による加工状態判定法、そして安定限界線図の理論による定性的な裏付けにより、自己学習することが可能となった。物理モデルあるいは理論による定性的性質に、センサ情報によって獲得した定量的情報をうまく融合するというアプローチでなし得た手法であり機能である。

薄物部品の安定条件については、動的に加工条件を修正する必要がある。本研究で適用した変速切削法は、制御を行わない場合に比してかなりの効果があったといえる。しかしながら制御方針を考える時に、安定限界線図のいわゆる自動制御のアプローチでは難しかった。本研究で薄物加工のモデル化を行なった結果、運動方程式がマシュー方程式に近似できることが分かった。加工状態の動的な変化をマシュー方程式の安定判別の平面内で追うことができるので、制御方針を立てる上では非常に有効と考えられる。実際の現象と対応づけるまでには至らなかったが、今後の課題としたい。

加工の知能化の概念と提案した種々の技術により自律型加工機械を実現した。

この加工機械で実現した機能は、(i) 加工条件の自己学習機能、(ii) 加工状態自己判定機能、(iii) 加工条件自己修正機能であった。これらの機能を機械部品加工に適用することにより、まず加工時間を大幅に短縮することができた。この結果だけでも生産システムに与える効果、影響は大きいと考える。さらに、加工状態を実時間で判定する機能を駆使することにより、加工状態を良好に保ちながら加工条件を自動的に、動的に修正することが可能になった。加工条件を動的に修正することによって、多くの異なった状況を経験することが可能になるため、自己学習機能の機能を最大限に発揮することができた。

本論文では、センサ情報として多軸力情報を取り上げて実際のシステムを構築した。多軸力情報を用いることによって多くの成果を得ることができた。しかしながら必ずしも十分とはいえない。例えば加工精度を考えてみると、これは工具と工作物の相対変位に大きく影響を受け、これは相互に作用する力だけでなく、種々の熱による加工機械の変形が影響を与える。この場合にはどんなに力情報を処理しても不可能で、熱変形に関する情報を別のセンサによって獲得する必要がある。ではどれだけのセンサがあれば十分であるかという問題がある。この問題に答えるのは非常に難しい。今述べた力と熱は必ずしも同じ物理現象によって発生しているわけではないので、適当なセンサで情報を得る必要がある。重要な点は、発生する物理現象を的確にとらえることができているかどうかである。この条件を満たすセンサが最低限必要なセンサとなる。加工に関して考えると最も重要であるのは力と熱であろう。少なくともこれらをセンシングするセンサが必要と考えられる。

本論文では加工機械としてマシニング・センタを選びエンドミル加工を行なった。しかしながら、

- ・ 対象や環境を予測する物理モデル、
- ・ 対象や環境を認識するためのセンサ、
- ・ 膨大なセンサ情報から必要な情報を抽出するための情報処理手法、
- ・ センサ情報に基づいて自己の行動を知的に決定するための制御アルゴリズム
- ・ 目的の行動を実現するためのアクチュエータ
- ・ マン・マシン・インタフェース

の基本要素を持ち、これらを情報のフィードフォワードとフィードバックが行なわれるように構成することによって、マシニング・センタ上の他の加工法(ドリル加工、タップ加工、リーマ加工など)や、旋盤などの他の加工機械についても同様に

知能化を実現することが可能と考えられる。加工法や加工機械が変わることによって予測する物理モデルや情報処理手法、制御アルゴリズムを適切に構築する必要はあるが、上記基本要素を必要とすることには変わりはない。

さて、一般に自律的あるいは知能的に動作を行なうためには、自分の動作に対する結果を知ることが必要不可欠である。人間においては、優秀な感覚器官を数多く備え、これらを駆使して自らの動作結果を知り、それを修正し経験を積み学習を行ってきた。このことを生産システムについて考えてみる。CAD/CAMや加工に関する知識に対して、AIの手法を用いてエキスパートシステムを適用することが多く試みられている。現在のところエキスパートシステム内部において知識をつくり出すことは実際問題で可能とはなっていないので、システムの知識は何らかの形で入力されなければならない。いかにして熟練者の知識をデータベース化していくかが、この分野の課題となっている。いずれにせよCAD/CAM自体は自らの動作に対して結果を見ることはできない。そのためそれらシステム自身では学習を行なうことは難しい。学習を行なうことがシステムの性質上容易であるのは加工機械なのである。

加工工程設計や形状設計、機能設計などもそれ自身のシステムとしては、加工機械のように容易に学習を行なわせる機能を付加することは難しいのだが、加工機械がセンサ情報とフィードバック・ループにより獲得した知識、学習結果をそれらの要求する形に変換してフィードバックできる。これにより各工程は間接的に自らの動作・決定の結果を知ることが可能となり、生産システム全体に学習効果を持たせることが可能となる。この意味でも、本研究で示した概念でもって加工機械を構成することは生産システムに与える効果も非常に大きいことが分かる。

将来の生産システムのあり方として、現在のような集中管理型ではなく部分指向の分散システムであるべきだという考え方から立つと、本研究のようなセンサ情報の基づいた知能化生産システムの構成法は非常に意義の大きいものと考えられる。

在本书中，我们主要关注的是如何设计一个有效的算法，以解决一个给定的问题。在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

第 9 章

結論

在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

在本书中，我们将介绍一些基本的算法设计技术，包括贪心算法、动态规划、回溯法和分支定界法等。我们将通过一些具体的例子来说明这些技术的应用，并讨论它们的优缺点。最后，我们将介绍一些更高级的算法设计技术，如线性规划和整数规划等。

単品生産において製品を短時間で精度良く加工するためには、生産システムを加工によって発生する多軸力情報を中心に構築することが重要であることを主張し、その構成法を示した上で、多軸力情報を得て実時間で加工状態を判定する手法と加工に関する知識の取り扱いについて新しい考え方を提案し、これによって加工機械が加工中に加工状態を監視し、加工条件を修正し、学習していく機能を実現し、その有効性を示した。

- 知能化を実現するためにシステムが有すべき基本要素は、(i) 対象や環境を予測する物理モデル、(ii) 対象や環境を認識するためのセンサ、(iii) 膨大なセンサ情報から必要な情報を抽出するための情報処理手法、(iv) センサ情報に基づいて自己の行動を知的に決定するための制御アルゴリズム、(v) 目的の行動を実現するためのアクチュエータ (vi) マン・マシン・インタフェースであると考え、情報のフィードフォワードと情報のフィードバックが行なわれるように、これらの要素を構成することが重要であると考えた。
- 基本要素の中で膨大なセンサ情報から必要な情報を抽出するための情報処理手法は、加工機械が自己の動作を知的に決定することおよび、加工動作を通して知識を獲得すること、すなわち知能化を実現する上で特に重要である。そこで「力ベクトルの軌跡」に基づいた実時間加工状態判定法を提案した。これによって、エンドミル加工において工具一回転分の多軸力情報によって加工状態を判定することが可能となった。
- 加工機械が自己の動作を知的に決定するためには、加工に関する知識を有することが重要である。特に安定な加工状態を実現する加工条件に関する知識は機械加工において最も基本的である。多軸力情報と実時間加工状態判定法に基づいた加工条件に関する知識の表現および獲得について、「実験的安定限界線図」の考え方を提案した。これにより加工機械が自律的に加工条件に関する知識を学習することが可能となった。
- 以上の考え方に基づいて自律型加工機械を試作し機械部品の加工を行なった。その結果、加工機械が加工状態に応じて柔軟に加工条件を修正し、常に加工状態を良好に保ち、加工時間を大幅に短縮できることを確認した。加工機械が多軸力情報に基づいて獲得した知識を設計部や加工工程計画部へ帰還することにより、生産システム全体の効率化を期待することができる。

以下に各章の結論を記す。

第1章

多品種少量の市場に迅速に対応し付加価値の高い製品を作るための技術の確立が急務であるが、そのためには生産システムの個々の生産設備が、(i) 自己診断機能や(ii) 自己修正機能、そして(iii) 自己学習機能を有する自律機械として実現されることが要求される。そのためには、各機械が自らの状態を把握するのに必要なセンシング機能を有し、これを駆使することによって自らの状態を監視、判定する機能により次に何をすべきか判断し、異常が発生した場合にはシステムを安全側に退避させた上で自動的に復帰する保護機能をもち、また作業の中で得た多くの情報を整理することによって経験と学習を行ない、その後の作業に反映できるように、機械構成を考える必要がある。特に加工機械においては加工中の現象に目し、その情報によってシステムを構成する考え方が重要である。

第2章

第1章の機能を有する加工機械を実現するためには、加工によって生ずる「物理現象の解明」と、そこから発生する情報の「実時間処理による獲得」、およびそれらの情報ならびに加工に関する知識を統合して「巧みに動作する機能」を加工機械に持たせることが必要である。すなわち「加工の知能化」の考え方を持って加工機械の構成を提案した。提案したシステムは、(i) マルチセンサ融合型加工機械、(ii) 実時間加工状態判定、(iii) 加工に関する知識、(iv) センサ情報帰還型CAD/CAM、(v) デュアルモード・ユーザインタフェースから構成される。本論文では特にセンサとして多軸力センサを取り上げ、多軸力センサを用いた知能化生産システムについて第3章以降で論じた。

第3章

加工で生じる物理現象の基本的理解が重要であるという立場から、マシニング・センタで非常によく使用される工具の一つであるスクエアエンドミルによる加工と、切削機構についてあまり解明が進んでいないタップ加工について加工の物理モデルを構築して、実験値との一致を見た。

第4章

加工機械が多軸力センサからの情報を受けとって、自らの動作を決定するためには、実時間で情報を処理する必要がある。そこでエンドミル加工について実時間加工状態判定法を提案した。これは多軸力センサによって獲得した多軸力情報

を n 次元空間にプロットすることによってできる図形を「力ベクトルの軌跡」と定義し、この図形形状を評価することによって、びびり振動、うなり、工具の摩耗状態を同時に判定できる手法である。

具体的には力ベクトルの軌跡の重心を求め、重心と軌跡上の各点との距離を計算し、その分散を計算する。びびり振動はこの分散値の大小によって判定できる。またうなりは分散値の経時変化に対する分散を監視することで認識される。さらに工具の摩耗状態は、重心の軌跡を監視することで認識できる。

この手法は特にびびり振動に関しては工具一回転分の多軸力情報により判定できるので実時間処理に適している。

第5章

膨大なセンサ情報を加工に関する知識として整理するには、加工現象の物理モデルの定性的性質により情報を圧縮し、多軸力情報により定量的性質を与えることが重要であることを主張した。その上で、安定した加工条件に関する知識を力ベクトルの軌跡による実時間加工状態判定法に基づいた「実験的安定限界線図」の形で整理できることを明らかにした。

さらに工作物の剛性が低い加工では、振動特性が変化するため安定限界線図の考え方を適用することが難しい。変速切削法の適用でかなり安定した切削を実現できることを実験で確認した。さらに薄物加工の加工現象をモデル化することにより、マッシュウ方程式の安定判別の適用により薄物加工の安定性を議論できるといふ新しい知見を得た。

第6章

第2章で提案した知能化生産システムの概念に基づいて、実際にインプリメントしたハードウェアについて、その構成と特性を示した。加工機械としてのマシニング・センタは外部の実時間制御器によって柔軟に制御できるように、外部制御が可能な入出力ポートを特別に装備している。力センサとしては、工作物側に作用する加工反力をセンシングする6分力テーブルを搭載している。6分力テーブルは剛性を保つために、力検出部を円筒、円環構造とし、長時間加工において加工熱に対処するために、円筒フィンを構造として持っている。無人加工における不測の事態として過負荷がかかった場合、システムの状態を安全側に避難させ、異常の原因が取り除かれると自動的に復帰できるフェイルセーフ機構として、フェイルセーフ・テーブルを搭載した。

第7章

第6章までの概念、ハードウェア、物理モデル、実時間加工状態判定法、加工に関する知識を統合して、自律型加工機械を実現した。自律型加工機械は、(i)加工条件および物理モデルなどの自己学習機能、(ii)加工状態を判定する自己判定機能、(iii)判定した加工状態に応じて加工条件を修正する自己修正機能を持っている。

実際に種々の機械部品を加工させることにより、加工状態を良好に保ちながら加工条件を自己修正することを確認し、加工時間を大幅に短縮することが可能となった。また加工中の動作を加工に関する知識として追加することが可能となった。

第8章

提案したシステムについて考察を加え、将来の生産システムについて展望した。

謝辞

本研究は、東京大学工学部産業機械工学科生産システム工学研究室において行なったものであります。本論文を完成させるにあたり、多くの方々の御協力と御指導を頂きました。謹んで感謝致します。

指導教官である長尾高明教授には、終始並々ならぬ御指導と暖かい励ましを頂きました。特に切削加工理論に関して多くの御示唆を頂きました。

佐藤壽芳教授には、論文をまとめるにあたり貴重な御助言、御示唆を頂きました。特に加工における振動問題に関して多くの御助言を頂きました。

畑村洋太郎教授には、研究会を始め折りにふれ、加工の知能化を始めとする生産システムに関して貴重な御意見、御指導を頂きました。

井上博允教授には、本論文を深く御検討下さり、数々の御指導と御助言を頂きました。

木村文彦教授には、本論文に関し有益な御教示を頂きました。

光石衛助教授には、筆者の大学院在籍中、研究全般にわたり平素から懇切なる御指導と御鞭撻を頂きました。

西保木助手、中島助手には加工実験において御助言を頂き、物品購入に際し御相談のつて頂きました。大西工作所の大西氏には6分力テーブルの加工を、池田製作所の池田氏には6分力テーブルの製作をして頂きました。THK 株式会社の山本氏にはフェイルセーフ・テーブルの製作をして頂きました。浜井産業株式会社の杉下氏には加工に関して現場の知識を教えて頂きました。株式会社松井製作所のファン氏には加工に関して適切な御助言を頂きました。

東京大学産業機械工学科生産システム工学研究室の皆様には、多くの御協力を頂きました。博士1年の堀俊夫君、修士2年の播本昌之君には研究室の計算機環境を整えて頂きました。修士2年の奥村君には制御プログラムに関して貴重な助言を頂きました。修士2年の小林君には加工実験の工作物の製作に際しワイヤカット使用に協力を頂きました。修士1年の太田君には2年間、ともに研究を行ない実験、CAD 環境の整備、制御プログラムの開発など多くの協力を頂きました。

本研究は、多くの先輩方、同輩および後輩の皆様方が残してきた多くの研究成果により進めることができました。

ここに深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

[1] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[2] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[3] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[4] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[5] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

参考文献

[1] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[2] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[3] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[4] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[5] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[6] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[7] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[8] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[9] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

[10] "The Effect of the New Economic Policy on the Development of the Russian Economy," *Journal of Economic Surveys*, 1992, vol. 6, no. 4, pp. 391-407.

- [1] "The First CIRP International Workshop on Concurrent Engineering for Product Realization," *Annals of the CIRP*, No. 41/2, pp. 743-746, 1992.
- [2] Sohlenius, G., "Concurrent Engineering," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/2, pp. 645-655, 1992.
- [3] 高田祥三, "コンカレントエンジニアリングとそれを支える技術," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, pp. 678-680, 東京, 1993.
- [4] 稲垣公夫, "NECにおけるコンカレント・エンジニアリングへの取り組み," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, pp. 678-680, 東京, 1993.
- [5] 小池昌義, 宮城善一, "コンカレントエンジニアリングにおける二段階設計法," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 627-628, 東京, 1993.
- [6] 村山長, 大場史憲, 小川昭, "コンカレント・エンジニアリングのための協調作業グループの動的構成法," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 629-631, 東京, 1993.
- [7] 若原剛人, 志村庄司, 乾正和, 佐田登志夫, 木村文彦, "加工向きプロダクトモデルに基づくマシニング・センタ用加工命令の自動生成," 精密工学会誌, Vol. 53-7, No. 21, pp. 1074-1079, 1987.
- [8] 松田三知子, 乾正知, 鈴木宏正, 木村文彦, "製品設計と工程設計を統合する形状特徴モデリング," 精密工学会誌, Vol. 54-12, No. 22, pp. 2334-2339, 1988.
- [9] 松田三知子, 乾正和, 木村文彦, "製品特徴記述に基づく切削加工情報自動生成," 精密工学会誌, Vol. 55-7, No. 23, pp. 1217-1222, 1989.
- [10] 松田三知子, "製品記述に基づいた加工の自動化," 東京大学工学部精密機械工学科学学位論文, 1989.
- [11] 安藤公一, 吉川弘之, "設計対象の機能記述に基づく設計・製造の統合化," 精密工学会誌, Vol. 56-2, No. 24, pp. 367-372, 1990.
- [12] 岩田一明, 杉村延広, 荒井英司, 乙井克也, "製品モデリングにおける精度情報の記述とその処理に関する研究," 精密工学会誌, Vol. 53-10, No. 21, pp. 1609-1615, 1987.
- [13] 花田武昌, 星鉄太郎, "完全自動CAM処理を行なうブロック状部品のCAD/CAMシステム," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-10, pp. 1728-1734, 1992.

- [14] Hanada, T. and Hoshi, T., "Block-Like Component CAD/CAM System for Fully Automated CAM Processing," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 551-555, 1992.
- [15] Kawabe, S., Shimura, S., Miyashita, K., Kimura, F., and Sata, T., "Programming for Machining Based on Workpiece Models in Computer," *Annals of the CIRP*, Vol. 32/1, pp. 351-355, 1983.
- [16] Arikani, M. A. Sahir and Totuk, Onat H., "Design by Using Machining Operations," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 185-188, 1992.
- [17] 乾正知, 鈴木宏正, 木村文彦, 佐田登志夫, "形状特徴操作に基づく機械加工工程設計の自動化," 精密工学会誌, Vol. 54-10, No. 22, pp. 1903-1908, 1988.
- [18] 正木宏, 小島俊雄, "形状特徴抽出を指向したソリッドモデリング手法," 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-1, pp. 110-115, 1991.
- [19] 小林一也, 山口泰, 木村文彦, "形状モデルのための基本インタフェース," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-2, pp. 259-264, 1992.
- [20] 岸義樹, "設計における思考支援システムの研究 - Prolog による置換操作基礎モデル -," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-5, pp. 803-811, 1992.
- [21] 岸義樹, "設計における思考支援システムの研究 - 知識を用いた制約コンパイラ -," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-6, pp. 979-986, 1992.
- [22] 酒井利彦, 薄木栄治, 村上幸己, 木村文彦, 伊藤俊太郎, "プロダクトモデルに基づく鉄道台車 CAD システムの開発," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-6, pp. 967-972, 1992.
- [23] Yamazaki, K., Kojima, N., Sakamoto, C., and Saito, T., "Real-Time Model Reference Adaptive Control of 3-D Sculptured Surface Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 479-482, 1991.
- [24] Bertok, P., Takata, S., Matsushima, K., Otsuka, J., and Sata, T., "A System for Monitoring the Machining Operation by Referring to a Predicted Cutting Torque Pattern," *Annals of the CIRP*, Vol. 32/1, pp. 439-444, 1983.
- [25] Thusty, J., Smith, S., and Zamudio, C., "New NC Routines for Quality in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 517-521, 1990.

- [26] Altintas, Y. and Spence, A., "End Milling Force Algorithms for CAD Systems," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 31-34, 1991.
- [27] Tsai, M. D., Takata, S., Inui, M., Kimura, F., and Sata, T., "Prediction of Chatter Vibration by Means of a Model-Based Cutting Simulation System," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 447-450, 1990.
- [28] Tsai, M. D., Takata, S., Inui, M., Kimura, F., and Sata, T., "Operation Planning Based on Cutting Process Models," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 95-98, 1991.
- [29] 高田祥三, 山崎好幸, "モデルベースインテリジェント加工ステーション (加工精度制御の実現)," 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 541-542, 静岡, 1991.
- [30] 高田祥三, 山崎好幸, "モデルベースインテリジェント加工ステーション - 切削シミュレーションによる加工シナリオの自動生成 -," 1992 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 787-788, 1992.
- [31] Takata, S., "Generation of a Machining Scenario and Its Applications to Intelligent Machining Operations," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 531-534, 1993.
- [32] Micheletti, G. F., Koenig, W., and Victor, H. R., "In Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations," *Annals of the CIRP*, Vol. 25/2, pp. 483-488, 1976.
- [33] Chryssolouris, G., "An Experimental Study of Strategies for Integrating Sensor Information in Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1, pp. 425-428, 1989.
- [34] Shiraishi, M. and Kume, E., "Suppression of Machine-Tool Chatter by State Feedback Control," *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 369-372, 1988.
- [35] 白石昌武, 久米悦雄, "状態フィードバックによるびり振動抑制の試み," 精密工学会誌, Vol. 55-1, No. 23, pp. 329-335, 1989.
- [36] Yao, Y., Fang, D., and Arndt, G., "Comprehensive Tool Wear Estimation in Finish-Machining via Multivariate Time-Series Analysis of 3-D Cutting Forces," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 57-60, 1990.
- [37] Dornfeld, D. A., "Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 101-104, 1990.

- [38] Yao, Y., Fang, X. D., and Arndt, G., "On-Line Estimation of Groove Wear in the Minor Cutting Edge for Finish Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 41-44, 1991.
- [39] Lundholm, Th., "A Flexible Real-Time Adaptive Control System for Turning," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 441-444, 1991.
- [40] 太田博, 川合忠雄, 吉野岳志, 葉建明, "振動解析による切削異常の検知 (第1報 びり振動の検知)," 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 57, No. 540, pp. 260-265, 1991.
- [41] Takata, S., Ahn, J. H., Miki, M., Miya, Y., and Sata, T., "A Sound Monitoring System for Fault Detection of Machine and Machining States," *Annals of the CIRP*, Vol. 35/1, pp. 289-292, 1986.
- [42] Takata, S., "Tool Breakage Monitoring by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed," *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 49-52, 1987.
- [43] Altintas, Y. and Yellowley, L., "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models," *Trans. of ASME*, Vol. 111, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 149-157, 1989.
- [44] Tarn, J. H. and Tomizuka, M., "On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling," *Trans. of ASME*, Vol. 111, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 206-212, 1989.
- [45] Thusty, J., "Sensing Cutter Breakage in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 45-51, 1988.
- [46] Smith, S. and Thusty, J., "Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 433-436, 1992.
- [47] 星鐵太郎, 中村公一, 芥田政昭, "フライス加工自動振動抑制システムの開発," 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 405-406, 1989.
- [48] Mannan, M. A. and Broms, S., "Monitoring and Adaptive Control of Cutting process by Means of Motor Power and Current Measurement," *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1, pp. 347-350, 1989.
- [49] 竹下拓利, 稲崎一郎, "アコースティックエミッションセンサを用いたフライス加工状態の自動監視," 精密工学会誌, Vol. 27, No. 59-2, pp. 269-274, 1993.

- [50] Lauderbaugh, L. K. and Ulsoy, A. G., "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Trans. of ASME, Vol. 111, Journal of Engineering for Industry*, pp. 13-21, 1989.
- [51] Yanushevsky, R. and Minis, I., "Optimal Control of the Cutting Force in Metal Cutting Operation," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2947-2952, 1990.
- [52] Lin, S. C., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "The Effect of Variable Speed Cutting on Vibration Control in Face Milling," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, 1990.
- [53] Smith, S. and J. Tlustý, "Update on High-Speed Milling Dynamics," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 142-148, May 1990.
- [54] 長尾真, 知識と推論, 岩波書店, 第1刷, 1988.
- [55] 山根俊明, 森和男, 笠島永吉, "リアルタイム知識制御の基礎概念 - インテリジェント制御加工の研究 (第1報) -," 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 133-134, 1991.
- [56] 山根俊明, 森和男, 笠島永吉, "インテリジェント制御装置の製作 - インテリジェント制御加工の研究 (第2報) -," 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 99-100, 1992.
- [57] 森和男, "インテリジェント制御機械加工システム," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 717-719, 東京, 1993.
- [58] 松村隆, 井原透, 白樫高洋, 臼井栄治, "最適切削条件選定用エキスパートシステムの開発に関する研究 (第1報) - システムの基本構成と工具摩耗評価用サブシステム -," 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-7, pp. 1274-1279, 1990.
- [59] 松村隆, 吉野雅彦, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井栄治, "最適切削条件選定用エキスパートシステムの開発に関する研究 (第2報) - 加工精度・仕上げ面粗さ評価用サブシステム -," 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-6, pp. 1053-1059, 1991.
- [60] 松村隆, 吉野雅彦, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井栄治, "最適切削条件選定用エキスパートシステムの開発に関する研究 (第3報) - 工具材の繰り返し衝撃破壊特性の獲得システム -," 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-4, pp. 661-666, 1992.

- [61] 松村隆, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井栄治, “最適切削条件選定用エキスパートシステムの開発に関する研究(第4報) - 工具欠損評価用サブシステムを利用した作業設計 -,” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-10, pp. 1691-1696, 1992.
- [62] 松村隆, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井栄治, “切削加工の自律型作業設計,” 精密工学会誌, Vol. 59, No. 10, pp. 1676-1682, 1993.
- [63] 松村隆, 帯川利之, 白樫高洋, 臼井栄治, “切削加工の自律型作業設計,” 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 656-658, 東京, 1993.
- [64] 米田孝夫, 嘉数侑昇, “習熟型研削加工システムの開発研究,” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-4, pp. 703-708, 1992.
- [65] 浅井昭夫, 鶴橋孝之, “金型切削加工における送り速度制御システムの開発,” 自動車技術, 第41巻, 1987.
- [66] 石村和彦, 生産システムのFA化設計, 日刊工業新聞社, 第1版, 1993.
- [67] 土井康弘, 本多庸恒, 井上久仁子(編), NCシステム事典, 朝倉書店, 初版第1刷, 1983.
- [68] 工作機械技術研究会(編), 工作機械87次世代FMS, 大河出版, 1987.
- [69] 長尾高明, 畑村洋太郎, 飯野謙次, “六軸力計を用いた自動研削システムの開発(第1報) - 3自由度システム -,” 精密工学会誌, Vol. 54-4, No. 22, pp. 774-780, 1988.
- [70] 畑村洋太郎, “加工の知能化とその基本構成,” 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 297-298, 1989.
- [71] 畑村洋太郎, 長尾高明, 光石衛, 高橋一敏, 一戸誠之, 西保木宏男, “6分力テーブルを用いたフレキシブル・マシニング・センタ,” 1987年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 395-396, 1987.
- [72] Hatamura, Y., Nagao, T., and Mitsuishi, M., “A Fundamental Structure for Intelligent Manufacturing,” *Proceedings from ASPE 1991 Annual Meeting*, 1991.
- [73] 畑村洋太郎, 長尾高明, 中川五郎, 杉下寛, 井上洋一, “マシニングセンタ無人運転用フェイルセーフシステム,” 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 861-862, 1988.

- [74] 畑村洋太郎, 長尾高明, 中川五郎, 井上洋一, 杉下寛, “フェイルセーフシステムとマシニング・センタへの適用,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-1, pp. 91-97, 1991.
- [75] 千々岩健児, 長尾高明, 木内学, 畑村洋太郎, 機械製法通論(下), 東京大学出版会, 第1版, 1985.
- [76] Kline, W. A. and DeVor, R. E., “The Prediction of Surface Accuracy in End Milling,” *Trans. of ASME*, Vol. 104, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 272-278, August 1982.
- [77] Tlusty, J., Cowley, A., and Elbestawi, M. A., “A Study of an Adaptive Control System for Milling With Force Constraint,” *Proc. NAMRC 6*, 1978.
- [78] Babin, T. S., Lee, J. M., Sutherland, J. W., and Kapoor, S. G., “A Model for End Milled Surface Topography,” *Proc. NAMRC 13*, SME, 1985.
- [79] Sutherland, J. W. and DeVor, R. E., “An Improved Method for Cutting Force and Surface Error prediction in Flexible End Milling Systems,” *Trans. of ASME*, Vol. 108, *Journal of Engineering for Industry*, November 1986.
- [80] Tlusty, J. and Ismail, F., “Special Aspects of Chatter in Milling,” *Trans. of ASME*, Vol. 105, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, pp. 24-32, January 1983.
- [81] Smith, S. and Tlusty, J., “An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process,” *Trans. of ASME*, Vol. 113, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 169-175, May 1991.
- [82] 藤井義也, 岩部洋育, “ねじれ刃エンドミルの切削過程,” 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 808-810, 1981.
- [83] 戸川隼人, UNIXワークステーションによる科学技術計算ハンドブック, 第8章, pp. 466-469, サイエンス社, 初版, 1992.
- [84] 日本数学会(編), 数学辞典, pp. 670, 株式会社岩波書店, 第二版第六刷, 1973.
- [85] 今野浩, 山下浩, 非線形計画法, 日科技連出版社, 第5刷, 1988.
- [86] Dyke, R. M., “Tapping with Numerical Control - Part One,” *Cutting Tool Engineering*, Vol. 25, pp. 2-3, 1973.

- [87] Dyke, R. M., "Tapping with Numerical Control - Part Two," *Cutting Tool Engineering*, Vol. 25, pp. 6-7, 1973.
- [88] Baker, A., "The Fundamentals Taps and Tapping," *Cutting Tool Engineering*, Vol. 28, pp. 6-19, 1976.
- [89] 隅部淳一郎, 大門守, "タップの切削トルクの解析 (第1報)," 精密工学会誌, Vol. 35, No. 7, pp. 34-40, 1969.
- [90] 隅部淳一郎, 大門守, "タップの切削トルクの解析 (第2報)," 精密工学会誌, Vol. 35, No. 9, pp. 30-35, 1969.
- [91] 北野彰彦, 中村示, 山本明, "AE 信号による断続切削時の初期欠損の検出 (第1報) - 二次元断続切削時の AE 計数率と振幅分布について -," 精密工学会誌, Vol. 52-7, No. 20, pp. 1167-1173, 1986.
- [92] 森脇俊道, 樋野勘, "AE を用いたコーティング工具の寿命検出に関する研究," 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-7, pp. 1259-1264, 1991.
- [93] 和田正毅, 水野萬亀雄, 笹田直, "AE による摩擦・摩耗の研究 - 銅の摩耗形態と AE 周波数 -," 精密工学会誌, Vol. 56-8, No. 24, pp. 1474-1479, 1990.
- [94] 和田正毅, 水野萬亀雄, 笹田直, "AE による摩擦・摩耗の研究 - 挽付き過程の AE 計測 -," 精密工学会誌, Vol. 56-10, No. 24, pp. 1835-1840, 1990.
- [95] 櫻村幸辰, "切削分力比率による工具逃げ面摩耗の予測に関する研究 (第2報) - 送り制御下における摩耗判定基準の設定 -," 精密工学会誌, Vol. 52-6, No. 20, pp. 1068-1072, 1986.
- [96] 池尾真太郎, 白濱敏一, 平尾政利, 安井武司, "競合学習ネットワークを用いたエンドミルの欠損検出," 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 709-710, Kyoto, Japan, 1993.
- [97] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, 畑村洋太郎, "知識獲得型マシニングロボットの開発," 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 711-712, Tokyo, Japan, 1990.
- [98] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, 畑村洋太郎, "力センサを用いた実時間加工状態判定システム," 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 135-136, Shizuoka, Japan, 1991.

- [99] Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y., and Warisawa, S., "Real-Time Machining State Detection Using Multiaxis Force Sensing," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 505-508, Nice, France, 1992.
- [100] 櫻村幸辰, "ねじ旋削に関する研究(第1報) - 工具摩耗検出のための基礎実験 -, " 精密工学会誌, Vol. 52-9, No. 20, pp. 1616-1622, 1986.
- [101] 田中武司, 沖津昭慶, "切削力のスペクトル解析による工具摩耗の追求 - SUS304 の断続切削の場合 -, " 精密工学会誌, Vol. 52-12, No. 20, pp. 2099-2106, 1986.
- [102] 白樫高洋, 井原透, 臼井栄治, "断続切削時の工具切れ刃摩耗と欠損発生の解析的予測," 精密工学会誌, Vol. 56-3, No. 24, pp. 515-520, 1990.
- [103] 竹山秀彦, 切削加工, 丸善株式会社, 初版, 1980.
- [104] 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島宗勉, 理論切削工学, 現代工学社, 初版, 1979.
- [105] Arnold, R. N., "Mechanism of Tool Vibration in Cutting of Steel," *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 154, pp. 261, 1946.
- [106] Merritt, H. E., "Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter," *Trans. of ASME, Vol. 87, Journal of Engineering for Industry*, pp. 447-454, 1965.
- [107] Tobias, S. A., *Machine Tool Vibration*, Wiley, New York, 1965.
- [108] Koenigsberger, I. and Thusty, J., *Structures of Machine Tools*, Pergamon Press, 1971.
- [109] Sadek, M. M. and Knight, W. A., "Dynamic Acceptance Tests Applied to a Center-Type Lathe," *Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 1975.
- [110] Kim, K. J., Eman, E. F., and Wu, S. M., "Identification of Natural Frequencies and Damping Ratios of Machine Tool Structures by the Dynamic Data System Approach," *J. of MTDR*, Vol. 24, No.3, 1984.
- [111] Brown, D. L., "Grinding Dynamics," The University of Cincinnati, 1976.
- [112] Taylor, H. R., "A Comparison of Methods for Measuring the Frequency Response of Mechanical Structures with Particular Reference to Machine Tools," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 191, 1977.

- [113] 佐藤寿芳, “切削時自励振動の総合的特性解明に関する研究,” 昭和60年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1985.
- [114] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, “実時間加工状態判定法を用いた薄物部品の適応制御切削の試み,” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 463-464, Yokohama, Japan, 1993.
- [115] 星鐵太郎, 機械加工びびり現象-解析と対策, 工業調査会, 第2版, 1979.
- [116] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, “実時間加工状態判定法を用いた薄物部品の適応制御切削の試み(第2報)-薄物工作物および工具の物理モデルの記述-,” 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 887-888, Kyoto, Japan, 1993.
- [117] 臼井英治, 現代切削理論-コンピュータ解析と予測システム-, 共立出版株式会社, 初版1刷, 1990.
- [118] McLachlan, N. W., *Application of Mathieu Functions*, Dover Publications, Inc., 1964.
- [119] 日本数学会(編), 数学辞典, 株式会社岩波書店, 第二版第六刷, 1973.
- [120] 得丸英勝, 振動論, コロナ社, 1973.
- [121] 振動工学ハンドブック編集委員会(編), 振動工学ハンドブック, 株式会社養賢堂, 第1版, 1976.
- [122] Newland, D.E., *Mechanical Vibration Analysis and Computation*, Longman Group UK Limited, London, 1989.
- [123] 奥村努, 中尾政之, 畑村洋太郎, “加工発熱に対処した6分力センシングテーブルの開発,” 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 873-874, Kyoto, Japan, 1993.
- [124] 畑村洋太郎, 割澤伸一, 加藤賢一, 光石衛, 長尾高明, “フェイルセーフテーブルの開発,” 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 797-798, Hakata, Japan, 1992.
- [125] インターフェース, No. 99, CQ出版社, 1985.
- [126] 光石衛, 割澤伸一, 長尾高明, “実時間加工状態判定法に基づく切削条件自動設定システムの開発,” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 461-462, Yokohama, Japan, 1993.

- [127] 割澤伸一, 太田孝史, 光石衛, 長尾高明, “実時間加工状態判定法に基づく切削条件自動設定システムの開発(第2報) - センサ情報と加工形状情報に基づく加工条件修正制御 -,” 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 889-890, Kyoto, Japan, 1993.
- [128] 割澤伸一, 太田孝史, 光石衛, 長尾高明, “多軸力情報に基づく実時間加工条件修正システムの試み,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '93 (ROBOMECH '93), Hokkaido, Japan, 1993.
- [129] 藤井義也, 岩部洋育, “ねじれ刃エンドミルのたわみに及ぼすチャックおよびコレットの影響と加工精度,” 精密工学会誌, Vol. 52-2, No. 20, pp. 273-278, 1986.
- [130] 松原十三生, 山本久隆, 水本洋, “中ぐり加工における再生びり振動の研究(第1報) - 振動特性に方向性がある中ぐり棒 -,” 精密工学会誌, Vol. 52-7, No. 20, pp. 1236-1242, 1986.
- [131] 松原十三生, 山本久隆, 水本洋, “エンドミル加工精度に関する研究(第2報) - 側面切削実験における加工精度 -,” 精密工学会誌, Vol. 52-8, No. 20, pp. 1348-1353, 1986.
- [132] 鈴木清, 植松哲太郎, 中川威雄, “びり振動切削における繊維製造領域,” 精密工学会誌, Vol. 53-6, No. 21, pp. 921-927, 1987.
- [133] 白顔敬一, 稻村豊四郎, 安井武司, “エンドミル加工における加工誤差の推定と要因分析,” 精密工学会誌, Vol. 53-9, No. 21, pp. 1433-1439, 1987.
- [134] 小林明彦, “エンドミルの溝削りにおける切削特性,” 精密工学会誌, Vol. 53-10, No. 21, pp. 1555-1561, 1987.
- [135] 櫻村幸辰, “ねじ旋削に関する研究(第2報) - 工具摩耗のねじ精度への影響と損耗監視システムの開発 -,” 精密工学会誌, Vol. 53-6, No. 21, pp. 946-952, 1987.
- [136] 臼井英治, 井原透, 笹原弘之, 白樫高洋, “自動びり振動における動的切削過程の非線形効果(第1報) - 動的切削過程のすべり線場解析 -,” 精密工学会誌, Vol. 55-11, No. 23, pp. 2017-2023, 1989.
- [137] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, “マシニングロボット用最適加工条件決定システムの構築,” *Proceeding of the Symposium on Industrial Applications of PROLOG*, pp. 55-62, Tokyo, Japan, 1989.

- [138] 臼井栄治, 呉進, 帯川利之, “接触面積拘束工具のびびり振動抑制効果 (第1報) - 共振過程の解析と振動抑制機構の検討 -, ” 精密工学会誌, Vol. 24, No. 56-2, pp. 336-342, 1990.
- [139] 大久保信行, 今村一哉, “実稼働中の機械構造物の振動解析,” 精密工学会誌, Vol. 56-2, No. 24, pp. 361-366, 1990.
- [140] 倉賀野哲雄, 佐々木伸夫, “意匠的に特徴ある自由形状加工用工具経路自動生成システム FREESDAM/M,” 精密工学会誌, Vol. 56-5, No. 24, pp. 879-884, 1990.
- [141] 葛岡英明, 割澤伸一, 大村裕子, 光石衛, 廣瀬通孝, 石井威望, “加工の臨場感通信システムの人間工学的考察,” 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 501-502, Hokkaido, Japan, 1990.
- [142] 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, “センサ情報に基づくデザイン・システムの構築,” 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 915-916, Hokkaido, Japan, 1990.
- [143] 光石衛, 割澤伸一, 葛岡英明, 畑村洋太郎, 長尾高明, “加工の臨場感通信システムの試み,” 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 503-504, Hokkaido, Japan, 1990.
- [144] 光石衛, 割澤伸一, 長尾高明, 畑村洋太郎, “臨場感をもつ対置地からの加工システムの試み,” 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 609-610, Tokyo, Japan, 1991.
- [145] 光石衛, 割澤伸一, 関念鷹聡, 畑村洋太郎, 長尾高明, “超環境を結ぶヒューマン・フレンドリな生産システム,” 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 179-186, Tokyo, Japan, 1991.
- [146] 関念鷹聡, 光石衛, 割澤伸一, 畑村洋太郎, 長尾高明, “多軸力-音変換法に基づく加工の臨場感通信システムの試み,” 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 137-138, Shizuoka, Japan, 1991.
- [147] 呉進, 帯川利之, 臼井栄治, “接触面積拘束工具のびびり振動抑制効果 (第2報) - 2自由度工具系再生びびりにおける安定限界の改善 -, ” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-1, pp. 161-165, 1991.

- [148] 井原透, 三木勉, “切削加工における解析および経験知識勘案型の知識表現 (第1報) - 再生びりり安定限界予測 -, ” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-2, pp. 250-255, 1991.
- [149] 森脇俊道, 板東徹, 宮本祐輔, “工作機械の剛性解析のためのインパルス加振器の開発,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-2, pp. 292-297, 1991.
- [150] 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. 25, , 1991.
- [151] 佐々木哲夫, 三好隆志, 齊藤勝政, 加藤木修, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究 (第1報) - 金型熟練工の手磨き特性 -, ” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-3, pp. 497-503, 1991.
- [152] 三好由記博, “適応フィルタを使った切削振動系のインプロセス同定,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-3, pp. 544-549, 1991.
- [153] 中沢弘, 大坪鉄郎, “情報積算法を応用した最適研削条件決定システム,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-5, pp. 863-868, 1991.
- [154] 矢野章成, 樋口誠宏, 宅間正則, “ファジィ制御による加工精度の向上,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-7, pp. 1283-1288, 1991.
- [155] 井原透, 三木勉, “切削加工における解析および経験知識勘案型の知識表現 (第2報) - 多段階推論による3次元びりり限界推定 -, ” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-9, pp. 1591-1596, 1991.
- [156] 三好由記博, “適応フィルタとニューラルネットワークを用いた切削異常状態の検知,” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-10, pp. 1774-1779, 1991.
- [157] 佐々木哲夫, 三好隆志, 齊藤勝政, 加藤正則, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究 (第2報) - 金型磨き作業支援エキスパートシステム -, ” 精密工学会誌, Vol. 25, No. 57-12, pp. 2151-2156, 1991.
- [158] 樋口俊郎, “微小深穴加工自動化のための磁気サーボ浮上システムの設計,” 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 533-534, 1990.
- [159] 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, “ファジィ・インプロセス制御研削加工,” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-2, pp. 313-318, 1992.

- [160] 豊嶋敏雄, 柴坂敏郎, 宅間正則, 北澤昌昭, “旋削加工における状態監視システムに関する研究(第1報) - ファジィ積分モデルによる工具交換時期の評価 -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-6, pp. 993-998, 1992.
- [161] 米田孝夫, 服部志保, 嘉数侑昇, “ニューラルネットワークを用いた研削条件最適化に関する研究 - 学習データが欠落している場合の学習方法と異質データの検出方法 -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-7, pp. 1239-1245, 1992.
- [162] 小野元久, 菅原章, 矢野宏, “微小径ドリル加工に関する研究(第1報) - 切削抵抗の測定について -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-8, pp. 1345-1350, 1992.
- [163] 米田孝夫, 山中将, 嘉数侑昇, “ニューラルネットワークを用いた研削条件最適化に関する研究 - 追加学習方法について -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-10, pp. 1691-1696, 1992.
- [164] 佐々木哲夫, 三好隆志, 齊藤勝政, 岡田信一郎, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究(第3報) - 金型自動磨き装置の試作・開発 -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-12, pp. 2037-2043, 1992.
- [165] 中島利隆, 塚本真也, 村上大介, 倉田勝弘, 安田浩隆, “ファジィ・インプロセス制御による研削加工の最適化 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究(第2報) -, ” 精密工学会誌, Vol. 26, No. 58-12, pp. 2057-2062, 1992.
- [166] 樋口俊郎, 茂木康男, “磁気サーボ浮上システムを用いたマイクロドリリング加工(第2報) 下穴とドリルの能動的な中心合わせ, ” 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 169-170, 1992.
- [167] 森脇俊道, 森芳信, “ニューラルネットワークを用いた切削状態の認識に関する研究, ” 精密工学会誌, Vol. 27, No. 59-5, pp. 779-784, 1993.
- [168] 川崎淳司, 長尾高明, 光石衛, 割澤伸一, “多軸力センサを用いたタップ加工の解析, ” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 464-465, Yokohama, Japan, 1993.
- [169] 堀俊夫, 播本昌之, 割澤伸一, 光石衛, 長尾高明, “実時間加工状態判定法に基づく連隔加工におけるバイラテラル制御, ” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 709-710, Yokohama, Japan, 1993.
- [170] 播本昌之, 光石衛, 長尾高明, 畑村洋太郎, 割澤伸一, 堀俊夫, 東豊一郎, 杉下寛, “3次元ジョイスティックを用いた工作機械の臨場感連隔操作システム, ”

- 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 707-708, Yokohama, Japan, 1993.
- [171] 大谷敏昭, “パソコンを用いた適応制御切削加工装置の開発,” 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 455-456, Yokohama, Japan, 1993.
- [172] 小久保邦彦, 村田良司, “衝撃加振時のバイト振動と工具摩耗の相関性に関する研究,” 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 457-458, Yokohama, Japan, 1993.
- [173] 清水伸二, 岡部真幸, 高橋健, “加工情報の統計的処理による小径ドリルの欠損予知法,” 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 459-460, Yokohama, Japan, 1993.
- [174] 樋口俊郎, 茂木康男, “磁気サーボ浮上システムを用いたマイクロドリリング加工 第3報 加工状態のモニタリング,” 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 471-472, Yokohama, Japan, 1993.
- [175] 寺本孝司, 岩田一明, 平井慎一, “プロセスモデル自動更新型学習制御によるエンドミル加工の高精度化,” 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 475-476, Yokohama, Japan, 1993.
- [176] 堀俊夫, 光石衛, 長尾高明, “遠隔臨場感操作加工システムにおける加工状態の力覚による提示の試み,” 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 65-66, Kyoto, Japan, 1993.
- [177] 光石衛, 播本昌之, 堀俊夫, 長尾高明, “遠隔臨場感加工における予測情報提示システム,” 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 67-68, Kyoto, Japan, 1993.
- [178] 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, “三つめチャック加工における工作物剛性の方向依存性,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 48, No. 429, pp. 761-768, 1982.
- [179] 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, “三つめチャック加工時に生ずる特異なびりマークの観察,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 48, No. 434, pp. 1633-1639, 1982.
- [180] 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, “びり振動に及ぼす工作物支持条件の影響,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 49, No. 443, pp. 1153-1160, 1983.

- [181] 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, “びびり振動に及ぼすチャック-工作物系の減衰特性の影響,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 50, No. 460, pp. 2392-2398, 1984.
- [182] 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, “チャック加工における係数防振振動の研究,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 51, No. 463, pp. 649-655, 1985.
- [183] 大堀真敬, 佐藤寿芳, 谷泰弘, 孫宝元, “旋削時自励振動における切削断面積と切削力について,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 52, No. 477, pp. 1707-1712, 1986.
- [184] 樋口峰夫, 土井雅博, 益子正巳, “旋削加工におけるびびり振動の発生判定に関する研究,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 52, pp. 1697-1700, 1986.
- [185] 近藤諒孝, 河野治, 佐藤寿芳, 駒崎正洋, “多重再生効果を考えた自励振動の挙動について,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 56, No. 409, pp. 1024-1032, 1990.
- [186] 亀崎俊一, 青山藤太郎, 船崎一郎, “金型自動研磨ロボットシステムの開発 (フジ理論を適用した研磨力の制御),” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 57, No. 543, pp. 308-313, 1991.
- [187] 井上英夫, “エコファクトリー,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 673-676, 東京, 1993.
- [188] 松本和男, “自動車部品における新製品開発～生技開発の取り組み,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, pp. 681-683, 東京, 1993.
- [189] 米田孝夫, “工作機械の知能化支援技術,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 714-716, 東京, 1993.
- [190] 井原透, “高度な自動化とは異なる知能化機械加工,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 720-722, 東京, 1993.
- [191] 橋本正俊, 丸井悦男, 加藤仁, “平フライス削りに発生する一次びびり振動に関する実験的研究,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 723-725, 東京, 1993.
- [192] 帯川利之, 笹原弘之, 白樫高洋, 白井栄治, “切削自励びびり振動におけるカオスの挙動,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 726-728, 東京, 1993.

- [193] 中条昌三, 土井雅博, “旋削加工におけるびりり振動発生判定に関する研究(第3報 切削中の動的コンプライアンスの検討),” 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, No. 930-9, pp. 729-731, 東京, 1993.
- [194] 光石衛, 額澤伸一, 太田孝史, 長尾高明, “実時間加工状態判定法に基づくラビッド・マニファクチャリング・システムの開発,” 日本機械学会第3回設計工学・システム部門講演会, No. 930-27, pp. 213-218, Tokyo, Japan, 1993.
- [195] Kals, H. J. J., “On the Calculation of Stability Charts on the Basis of the Damping and the Stiffness of the Cutting Process,” *Annals of the CIRP*, Vol. 19, 1971.
- [196] Tlustý, J. and Macneil, P., “Dynamics of Cutting Forces in End Milling,” *Annals of the CIRP*, Vol. 21, pp. 21-25, 1975.
- [197] Sexton, J.S. and Stone, B.J., “The Stability of Machining with Continuously Varying Spindle Speed,” *Annals of the CIRP*, Vol. 27/1, pp. 321-326, 1978.
- [198] Tlustý, J., “Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics,” *Annals of the CIRP*, Vol. 27, 1978.
- [199] Tlustý, J. and Elbestawi, M., “Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills,” *Annals of the CIRP*, Vol. 28, 1979.
- [200] Tlustý, J. and Ismail, F., “Basic Nonlinearity in Machining Chatter,” *Annals of the CIRP*, Vol. 30, pp. 21-25, 1981.
- [201] Nakayama, K., Arai, M., and Takei, K., “Semi-Empirical Equations for Three Components of Resultant Cutting Force,” *Annals of the CIRP*, Vol. 32/1, 1983.
- [202] Tlustý, J., Hernandez, I., and Zamudio, C., “High Speed High Power Spindles With Roller Bearings,” *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 267-272, 1987.
- [203] Ber, A. and Zombach, S., “A Method for Cutting Force Evaluation of End Mills,” *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 37-40, 1988.
- [204] Chandrasekaran, H., Thuvander, A., and Wisell, H., “Modeling of Tool Stresses in Peripheral Milling,” *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 41-43, 1988.
- [205] Nagao, T. and Hatamura, Y., “Investigation into Drilling Laminated Printed Circuit Board Using a Torque-Thrust-Temperature Sensor,” *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 79-82, 1988.

- [206] Hatamura, Y., "Development of a Fail-Safe System for NC Machining Centers," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 409-412, 1990.
- [207] Armarego, E. J. A. and Deshpande, N. P., "Computerized End-Milling Force Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 25-29, 1991.
- [208] Tlustý, J., Smith, S., and Zamudio, C., "Evaluation of Cutting Performance of Machining Centers," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 405-410, 1991.
- [209] Hatamura, Y., Nagao, T., Mitsuishi, M., Kato, K., Taguchi, T., Okumura, T., Nakagawa, G., and Sugishita, H., "Development of an Intelligent Machining Center Incorporating Active Compensation for Thermal Distortion," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 549-552, 1993.
- [210] Hanada, T. and Hoshi, T., "Block-Like Component CAD/CAM System for Fully Automated CAM Processing," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 551-555, 1993.
- [211] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Ohta, T., and Nagao, T., "Development of a Rapid Manufacturing System Using Real-Time Machining State Detection," *Proceedings from ASPE 1993 Annual Meeting*, pp. 531-534, Washington, U.S.A., November 1993.
- [212] Merchant, M. E., "Basic Mechanics of the Metal Cutting Process," *Trans. of ASME*, Vol. 11, *Journal of Engineering for Industry*, 1944.
- [213] Martellotti, M., "An Analysis of the Milling Process, Part II-Down Milling," *Trans. of ASME*, Vol. 67, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 233-251, 1945.
- [214] Hahn, R. S., "Metal Cutting Chatter and its Elimination," *Trans. of ASME*, Vol. 75, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 1073, 1953.
- [215] Kegg, R. L., "Cutting Dynamics in Machine Tool Chatter," *Trans. of ASME*, Vol. 87, *Journal of Engineering for Industry*, 1965.
- [216] Sarnicola, J. F. and Boothroyd, "Machine Tool Chatter: Effect of Surface Slope on Machining Forces During Wave Removing," *Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 1974.

- [217] Lin, S. C., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "A Fast Algorithm for On-Line Machining Process Modeling and Adaptive Control," *Trans. of ASME, Vol. 111, Journal of Engineering for Industry*, pp. 133-139, 1989.
- [218] Fussell, B. K. and Srinivasan, K., "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions," *Trans. of ASME, Vol. 111, Journal of Engineering for Industry*, pp. 27-36, 1989.
- [219] Jha, N. K., "A Discrete Data Base Multiple Objective Optimization of Milling Operation Through Geometric Programming," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 368-374, 1990.
- [220] Rangwala, S. and Dornfeld, D., "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 219-228, 1990.
- [221] Minis, I. E., Magrab, E. B., and Pandelidis, I. O., "Improved Methods for the Prediction of Chatter in Turning, Part 1: Determination of Structural Response Parameters," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 12-20, February 1990.
- [222] Minis, I. E., Magrab, E. B., and Pandelidis, I. O., "Improved Methods for the Prediction of Chatter in Turning, Part 2: Determination of Cutting Process Parameters," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 21-27, February 1990.
- [223] Minis, I. E., Magrab, E. B., and Pandelidis, I. O., "Improved Methods for the Prediction of Chatter in Turning, Part 3: A Generalized Linear Theory," *Trans. of ASME, Vol. 112, Journal of Engineering for Industry*, pp. 28-35, February 1990.
- [224] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., Nagao, T. and Kramer, B., "Human-Friendly Operating System for Hyper-Environments," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14/2, pp. 167-178, 1992.
- [225] 光石衛, 東豊一郎, 朝澤伸一, "テレ・マシニングにおける操作システムの研究," *Human Interface, News and Report*, 第7/2巻, pp. 289-294, Tokyo, Japan, 1992.

- [226] 光石衛, 小林統, 齋澤伸一, “聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システム,” *Human Interface, News and Report*, 第7/2巻, pp. 307-312, Tokyo, Japan, 1992.
- [227] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Higashi, T., Kobayashi, O., Hatamura, Y., Nagao, T., and Kramer, B., “A Tele-Machining System Using Multi-Axis Force Data and Stereo Sound Information,” *Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 227-234, Tokyo, Japan, 1992.
- [228] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., Nagao, T., and Kramer, B., “A User-Friendly Manufacturing System for “Hyper-Environments”,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, 1992.
- [229] Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y., Kramer, B., and Warisawa, S., “A Manufacturing System for the Global Age,” *The Eight International IFIP WG5.3 Conference (PROLAMAT '92)*, pp. 841-852, Tokyo, Japan, 1992.
- [230] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., and Nagao, T., “Trial of a Remote Reality-Based Manufacturing System in Japan Operated from the United States,” *Proceedings of Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Vol. 1, pp. 1491-1498, San Francisco, U.S.A., 1992.
- [231] 光石衛, 播木昌之, 畑村洋太郎, 長尾高明, “聴覚情報への変換による異世界間の情報伝達システム,” 第10回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, Kanazawa, Japan, 1992.
- [232] 堀俊夫, 光石衛, 齋澤伸一, 長尾高明, “加工の物理モデルを用いた時間遅れ補償型力覚情報提示の試み,” *Human Interface, News and Report*, 第8巻, pp. 241-246, Tokyo, Japan, 1993.
- [233] Ales, T. (前澤成一郎訳), 回転軸の力学, コロナ社, 1971.
- [234] 東芝機械マシニングセンタ研究会(編), 知りたいFMSとMC, 株式会社ジャパンマシニンスト, 初版, 1986.
- [235] 有限会社エヌ・エヌ(編), 精度設計と部品仕上げシステム技術, 日経技術図書株式会社, 第1版, 1989.
- [236] 星鐵太郎, 機械加工の振動解析, 工業調査会, 第1版, 1990.
- [237] CIM/FA事典編集委員会(編), CIM/FA事典, 株式会社産業調査会事典出版センター, 再版, 1991.



Kodak Color Control Patches

Blue

Cyan

Green

Yellow

Red

Magenta

White

3/Color

Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A

1

2

3

4

5

6

M

8

9

10

11

12

13

14

15

B

17

18

19