The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	機械加工における適応的作業遂行のための技能拡張に関する研究
Author(s)	寺本, 孝司
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2495
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

機械加工における適応的作業遂行のための
技能拡張に関する研究

2004年4月

寺 本　孝 司

概 要

本研究は，機械加工において機械操作者が適応的に作業を遂行できるよう支援することを目的としている．

本論文では，まず，高度な柔軟性を有する加工ワークステーションを実現するためにどのような機能が必要であるのかについて，熟練作業者に関する分析・調査結果をもとに検討した．さらに，従来行われてきた加工研究を概観し，これまでの研究の課題を明らかにした．

つぎに，課題を克服するためのアプローチとして，作業者の状態認識支援と作業指令の整合性管理をもとにした作業遂行支援の枠組みを提案した．作業遂行過程の分析をもとに，作業遂行支援を行うにあたっては，高信頼度な加工シミュレーション，インプロセスでの加工状態推定，整合的作業設計といった機能が必要であることと，継続的な作業支援システムの利用には，作業者によるシステム再構築が不可欠であることを示した．

続いて，信頼度の高い加工シミュレーションを実現するための手法について検討を加えた．特に，シミュレーションにおける多相的なプロセス評価のための手法と，現象論的プロセスモデルを利用するうえで問題となる予備実験を低減するために導入したモデル学習について述べた．

さらに，加工プロセスの状態を作業者へ提示することによって，作業者の状況認識を支援する手法について述べた．まず，実プロセスの不確かさを反映した状態推定手法として，Sensor Configured Simulation の枠組みを提案した．そして，提案する手法の適用例として，工作物温度分布に対する状態推定例を示した．

また，これまで断片的に取り扱われてきた作業設計を一貫して処理する整合的作業設計の枠組みを提案した．分散制約充足の考え方をもとに，工作物把持方法・工具経路・加工条件の三者を整合的に決定する手法を提案した．さらに，作業者が作業設計システムをカスタマイズするための枠組みと試作システムについて述べた．

最後に本研究で得られた結論と今後の展望を示した．

目 次

第 1 章　緒論 **1**
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の目的 3
1.3　論文の構成 4
参考文献 6

第 2 章　機械加工における作業遂行の現状と課題 **8**
2.1　熟練作業分析の現状 8
2.1.1　人間の作業習熟過程の記述に関する研究 8
2.1.2　現存する熟練作業の能力記述に関する研究 13
2.1.3　熟練作業の人工的実現を指向した研究 17
2.1.4　人間を含む系での作業遂行に関する従来研究 18
2.1.5　熟練作業分析の現状と課題 20
2.2　加工研究の現状 20
2.2.1　加工プロセスのモデル化に関する研究 21
2.2.2　切削加工の作業設計に関する研究 27
2.2.3　加工状態の認識・診断に関する研究 28
2.2.4　加工研究の現状と課題 29
2.3　加工作業遂行における課題 29
参考文献 30

第 3 章　作業遂行支援の枠組み **38**
3.1　基本的な考え方 38
3.1.1　作業遂行における現在の課題 38
3.1.2　支援機能の抽出 43
3.2　抽出された支援機能の実現手法の提案 44
3.3　作業遂行支援の枠組み 45
参考文献 49

第 4 章　機械加工状態の多相的モデリングと高精度加工シミュレーション **50**
4.1　多相的加工状態表現 50
4.1.1　従来の加工シミュレーション 50
4.1.2　断片的なシミュレーション結果の統合における課題 52

4.1.3 多相加工プロセス表現 53
4.1.4 対応関係の導出手続き 54
4.1.5 加工対象表現に関するまとめ 57
4.2 ボールエンドミル切削加工シミュレーション 58
4.2.1 ボールエンドミル加工の切削力モデル 59
4.2.2 切削加工の幾何学的モデリング 62
4.2.3 試作シミュレーションシステムの構成と処理の流れ 67
4.2.4 評価実験 69
4.3 加工プロセスモデルの更新 76
4.3.1 数理計画法による切削モデルの同定 77
4.3.2 加工プロセスモデルの学習 80
4.3.3 切削力試験 (傾斜平面の加工) 83
4.4 本章のまとめ 92
参考文献 93

第 5 章 Sensor Configured Simulation を用いた加工状態の可視化 95
5.1 加工状態提示の枠組 95
5.2 Sensor Configured Simulation による加工状態推定の枠組み 97
5.3 Sensor Configured Simulation による工作物温度場の推定 97
5.3.1 工作物温度推定の背景 97
5.3.2 工作物温度の計算方法 98
5.3.3 切削加工中における工作物温度推定法の提案 98
5.3.4 有限要素法による定式化 100
5.4 工作物温度分布推定システムの実装 103
5.4.1 試作システムの概要 103
5.4.2 試作システムの構成要素とその役割 103
5.4.3 試作システムの処理 105
5.5 試作システムの評価 107
5.5.1 試作システムの評価実験概要 107
5.5.2 推定温度の評価 108
5.5.3 パラメータ同定による状況変化への適応 108
5.6 工作物温度推定の結論 111
参考文献 113

第 6 章 整合的作業設計とシステムの再構成 114
6.1 作業準備段階での作業設計支援 114
6.2 工作物把持と加工条件の整合的決定 115
6.2.1 工作物把持方法と加工条件の相互関連 116
6.2.2 モジュラー型問題解決器の構成 118
6.2.3 工作物把持方法と加工条件の整合的生成問題 120

6.2.4 整合的生成の評価課題 120
6.2.5 評価実験 122
6.2.6 整合的作業設計の結果 123
6.3 作業支援システムの再構成 123
6.3.1 加工準備段階での作業支援 124
6.3.2 作業状況の変化を考慮した作業設計システムの再構成 125
6.3.3 作業設計システムとシミュレータのカスタマイズ 126
6.3.4 試作システムの構成 127
6.3.5 例題 128
6.4 作業設計支援のまとめ 129
参考文献 131

第 7 章 結論および今後の展望 132
7.1 本論文の結論 132
7.2 今後の研究課題 132
7.3 展望 133

謝辞 135

本論文に関連する発表論文 136

第1章　緒論

1.1　研究の背景

工作機械は，機械の母といわれ，産業革命にさかのぼる開発と実用の歴史は長い．この間，極めて多くの研究開発が続けられ，産業界への貢献度も大きい．この工作機械も近年，とくに1990年代以降，要求条件や使用条件が急速に変化し続けている．

1990年代までの機械製品製造技術の発展は，統合化の範囲の拡大を目指した試みであったと解釈できる．すなわち，加工シーケンスを一括して管理するＮＣプログラムの導入にはじまり，ＮＣ工作機械群を制御するために開発されたFMS (Flexible Manufacturing System)，製造部門の統合を目指したCIM (Computer Integrated Manufacturing)，企業間での製造アクティビティの統合を目指したSCM (Supply Chain Management) というように，より広い範囲での統合を目指した試みが続けられてきた．そして，極めて高度な製品製造に係わる連鎖が形成されることにより，個々の製造工程が相互に，また複雑に影響を及ぼしあっている．

一方で，製造業をとりまく環境は1990年代以降大きく変化してきた．代表的な変化としては，製品開発期間の短期化，中国などの海外生産拠点への生産の移行に伴う国内生産の空洞化，製品の継続的高機能化に対する要求，環境負荷や労働者の働きがいといった新たな企業指標の導入，などが挙げられる．これらの変化は国内生産に関しては，定型的・定常的な製造プロセスの減少とともに，多様な評価尺度を考慮した迅速な状況変動への対応の必要性の増大という要求として反映されることとなる．このような変化への対応のひとつとして，製造部門でのモジュラリティを高めることにより，製造に係わる不確実要因への対応を計る試みがなされている．EMS(Electronic Manufacturing Services) と呼ばれる製造請負企業の成長 [EMS 02] や企業における製造部門の集約化の試みは，製造部門レベルでの不確実性への対応と理解できる．

このように高度にシステム化された製造部門において，状況変動への対応を行うために，セル型生産方式と呼ばれる小ロットの組立工程の導入 [山田 02] などが試みられているが，今後は部品製造レベルからより高い柔軟性を有する必要があると考えられる [日経メカニカル 99]．今後も開発され続けることが予想される新機能の材料へ対応可能な加工法のなかで，機械部品の製造においてもっとも柔軟性の高い製造プロセスは，切削加工に代表される除去加工である．これは，鍛造や射出成型などの変形加工が物理的な型の転写を加工原理とするのに対して，除去加工ではソフトウエア的に制御可能な運動軌跡の転写を行うという加工原理上の特徴に起因する．そして，量産部品の加工に関しては，ネットシェイプ加工と呼ばれる量産部品の高精度な成形加工技術が普及するに伴って，量産部品の生産における切削加工の適用は減少することが予想される．従って，今後の切削加工における評価尺度は，量産時にいかに精度を維持しつつ生産性を上げるかという従来の評価尺度から，多様かつ高精度な加工要求に対していかに迅速に対応するかという評価尺度へと変化していくものと考えられる．なお，柔軟な部品製造方法としては，一品生産を含む極少量生産に対して，光造形法に代表される積層型の形状創成手法の利用が提案さているものの，使用可能な材料が限定されることが大きな課題となっている．

現在における加工ワークステーションレベルでの適応能力の源泉はＮＣ工作機械の普及以前

から加工を行ってきた高度な熟練作業者に支えられている．一部の企業においては，このような高度な技能労働者を基盤とした製造方法を進化させ続けているものの [山脇 98]，1990 年代以降，熟練技能の役割の分析 [佐々木 94][佐々木 98] や，技能伝承の危機が様々なところで指摘され続けたにもかかわらず [日経メカニカル 93] [熟達マシンシステム 94] [日本機械学会誌 94] [機械と工具 95] [川野 97] [職業能力開発大学校 98] [プラントエンジニア 99]，結果として多くの製造企業では，熟練作業者の技能伝承の問題が深刻化し，国家レベルでの取り組みが必要とされるほど深刻化している [中小企業庁 00].

技能者の枯渇が問題となってきた原因としては，現在引退しつつある技能者と，通常の操作オペレータの間にある 2 つの大きな差異が考えられる．第一の差異とは，技能習熟のための作業環境の違いである．現在，退職が近づいている熟練作業者は，徒弟制に近い作業環境のなかで技能の習熟を行ってきた．そこでは，上級技能者を含む職能集団のなかで，工具研磨や治具製作から作業設計を経て工作機械の操作および検査に至る作業全般に関して，加工対象と相互作用を繰り返しながら作業が遂行されていた．これは，レイブの言う正統的周辺参加 [レイブ 93] の典型であり，単なる作業手法の習得ではなく，作業をとり囲む包括的な状況の中で，加工に関わる様々な事象に対して自己との関係性を構築するプロセスであったと考えられる．しかしながら，現在の多くの作業者は，このような汎用工作機械を用いた加工プロセスに密接した作業経験の蓄積を行うことなしに，NC 工作機械による間接的な作業遂行を続けてきた．結果として，加工プロセスに対して十分に個人化された知識 [ポラニー 85] は構築されておらず，技能伝承が困難になっていると考えられる．また，第二の差異としては，作業内容の違いが挙げられる．すなわち，近年のシステム化された生産部門においては，機械操作を行う作業者が加工方法や加工条件を新規に考える余地が少なくなっているということである．これは，ショップフロアレベルでの統合が進んだ結果，ひとつの加工プロセスでのトラブルが，他の多くのプロセスに影響してしまうという，工程変更リスクの増大と，加工事例の蓄積や CAM の高度化が進んだことによる定型的作業における自動化の普及の両者が起因している．この結果として，試行錯誤による機械操作技能の獲得や切削音や切屑状態からの加工状態認識能力の獲得といった，加工プロセスとの相互作用を通じた実加工に関する体験的知識の獲得が不十分になるものと考えられる．さらに，労働環境意識の高まりに伴う加工プロセスから隔離された作業者環境の普及により，今後，実加工体験に基づく作業経験の量的減少が加速され，技能習熟の困難さがより深刻になると考えられる．

このような加工技能の習熟環境の変化に加えて，習熟すべき内容についても以下の 2 点において変化している．第一の変化は，加工ワークステーション内での状況変化である．即ち，製品の小型化・高機能化に伴う加工対象の複雑形状化・薄肉化や，マグネシウム合金やチタン合金といった新たな加工材料の普及といった加工対象側の変化に加えて，継続的に開発されつづける新たな切削工具 [Klocke 99][関口 01][福井 01] への適応，切削油剤を使わないドライ切削 [Klocke 97][松原 02] や，高速切削への取り組みの広がり [Smith 97]，環境負荷を考えた新たな加工評価尺度 [Sheng 98] への対応，などのように加工プロセスの内容変化も顕著である．第二の変化は，生産設備の情報化の進展に伴って進行する，作業遂行形態の変化に起因する技能の変化である [中村 98][森 95][岩田 02]．Zuboff [Zuboff 88] は，情報処理システムの機能として，自動化 (Automating) と情報を伝えること (Infomating) の二つが存在することを指摘し，自動

化の進展に伴って消失する技能がある一方で，自動化機器の周辺で新たに情報を生成・管理するための熟練作業が発生すると述べている．工作機械の情報化においてもこの指摘はあてはまり，製造業へのアンケート [職業能力開発大学校 96] においても自動機械を導入したところ準備工程や保守工程が増加するという，Zuboff の指摘と同様の結果が報告されている．

以上のことから分かるように，現存する技能労働を固定化し，その表層的な現象を保存するだけでは不十分であり，技能者のもつ適応的作業遂行能力そのものを次世代においても具現化するための，新たな技能の創出を支援する仕組みが求められている．このような複雑な変動環境において，加工ワークステーションが継続的に状況変化に対応しつつ高度な部品製造を続けるためには，指定されたとおりにＮＣ工作機械を操作する作業員による加工ではなく，加工を取り巻く環境変動に適応できる機械操作技能者が適切な作業支援ツールを駆使して加工を行うことが不可欠であると言える．このような高度機械操作技能者[1]を育成するには，単なる個人的な経験の積み重ねに基づく能力向上に期待するだけでは不十分であり，既存の知識に関する系統的なアクセスも保障される必要がある [ドラッカー 99]．これは，現存する熟練技能の維持・伝承のみに注力して，技能者個人の能力を極端に重視することでは問題の解決には不十分であることを意味する．すなわち，実体験に基づく豊かな個人的知識と加工に対する一般的知識の両者を兼ね備え，積極的に作業遂行環境および作業工程を再構築して新たな加工状況に対して適応的に作業を遂行できる高度機械操作技能者が自らの技能を拡張するための支援システムの構築が必要であると言える．

1.2 研究の目的

本研究は，前節で述べた適応的作業遂行を行う技能者と親和性の高い機械加工ワークステーションを実現するための基礎研究として，以下の諸テーマについて検討を行う．

- 熟練作業者の能力分析の整理・検討を通して，適応的作業遂行を実現するための必要機能を抽出する．
- 機械操作技能の高度化を支援するための作業遂行の枠組みを提案する．
- 提案した作業遂行の枠組みを実現するために必要となる基盤技術を確立する．

第一のテーマは，これまで数多くの研究者によって分析されてきた熟練作業者の能力の中で，本研究で取り扱うべき機能を抽出することである．今日の社会情勢では，現存する熟練作業者が習熟に要した時間および経験のための試行のいずれについても，今後の習熟過程では作業者に提供することは困難である．それにもかかわらず，高度な熟練作業者への依存は局所的に極めて高まっているという状況にある．このような作業者を取り巻く環境において，既存の熟練研究および加工研究に関する文献調査を基に，適応的作業遂行のための技能を効率的に伝承・発展させるために注力すべき問題点を探索し，選別する．

[1] ドラッカーは，今後重要となる労働者として，高度な専門知識を有しつつ肉体的な労働を行う労働者をあげ，テクノロジストと呼んだ．この表現をもちいるならば，本研究で対象とする高度機械操作技能者とは，機械加工領域におけるテクノロジストと言える．

第二のテーマは，これまでの技術開発を踏まえて，どのような枠組みで作業遂行支援を考えるべきかに対する本研究の提案である．提案する枠組みは，作業遂行時の作業者の行為の支援のみならず，状況の変化に対応して作業者が加工ワークステーションを再構成することにより適応的な作業遂行が行えるよう配慮したものとなっている．

第三のテーマは，提案する枠組を実現するために必要となる機能の分析に基づいた，実現可能性に対する構成的な検討である．また，システム具体化の過程を通じて，本手法の長所および欠点もより明確になると考えられる．

本研究では，適応的作業遂行を問題設定過程を含めた問題解決過程として取り扱う．これは，従来のように単純な問題解決過程として作業遂行を捉えるのではなく，問題の設定および問題設定に必要な様々な問題解決資源の構築も含めた過程として作業遂行をとらえようとするものである．

1.3　論文の構成

本論文は，図 1.1 に示すように，本章を含む 7 章から構成されている．

第 2 章では，高度な柔軟性を有する加工ワークステーションを実現するためにどのような機能が必要であるのかについて，既存の熟練作業者に関する分析・調査結果を基に検討する．さらに，従来行われてきた加工研究を概観し，これまでの研究の課題を明らかにする．

第 3 章では，第 2 章での課題を克服するためのアプローチとして，作業者の状態認識支援と作業指令の整合性管理を基にした作業遂行支援の枠組みについて示す．そして，作業遂行支援を行うにあたって，高信頼度な加工シミュレーション，インプロセスでの加工状態推定，整合的作業設計といった機能が必要であること，並びに作業者によるシステム再構築が作業者支援において不可欠であることを示す．

第 4 章では，信頼度の高い加工シミュレーションを実現するための手法について検討を加える．まず，シミュレーションにおける多相的なプロセス評価のための枠組みを提案する．そして，従来研究されることの少なかったボールエンドミルに対する切削力シミュレーションについて説明する．そして，現象論的プロセスモデルを利用する上で問題となる予備実験を低減するために導入したモデル学習について述べる．

第 5 章では，加工プロセスの状態を作業者へ提示することによって，作業者の加工状況認識を支援する手法について述べる．まず，実プロセスの不確かさを反映した状態推定手法として，Sensor Configured Simulation の枠組みを提案する．そして，提案する手法の適用例として，工作物温度分布に対する状態推定例を示す．

第 6 章では，これまで断片的に取り扱われてきた作業設計を一貫して処理する整合的作業設計の枠組みを提案する．分散制約充足の考え方を基にした，工作物把持方法・工具経路・加工条件の三者を整合的に決定する手法を提案する．ここでは，断片的な作業設計モジュール間での整合性の維持のために物理現象レベルでのシミュレーションを媒介とした影響の評価を行う．さらに，作業者が作業設計システムをカスタマイズするための枠組みと試作システムについて述べる．

最後の第 7 章において本研究で得られた結論と今後の展望を示す．

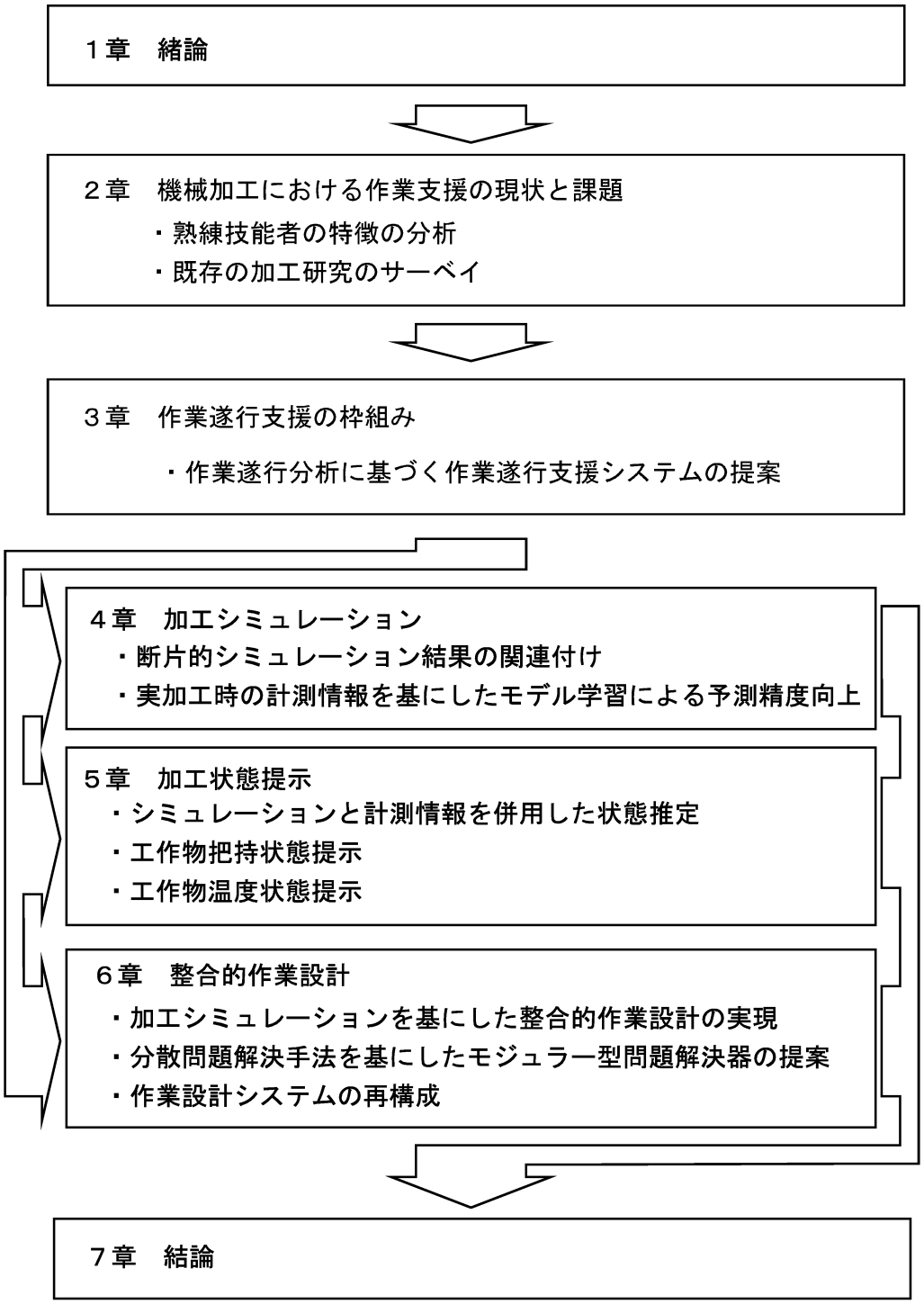

１章　緒論
２章　機械加工における作業支援の現状と課題
・熟練技能者の特徴の分析
・既存の加工研究のサーベイ
３章　作業遂行支援の枠組み
・作業遂行分析に基づく作業遂行支援システムの提案
４章　加工シミュレーション
・断片的シミュレーション結果の関連付け
・実加工時の計測情報を基にしたモデル学習による予測精度向上
５章　加工状態提示
・シミュレーションと計測情報を併用した状態推定
・工作物把持状態提示
・工作物温度状態提示
６章　整合的作業設計
・加工シミュレーションを基にした整合的作業設計の実現
・分散問題解決手法を基にしたモジュラー型問題解決器の提案
・作業設計システムの再構成
７章　結論

図 1.1 本論文の構成

参考文献

[EMS 02] 稲垣 公夫，”ＥＭＳと製造業の構造改革”，日本機械学会 生産システム部門講演会 2002 講演論文集，pp.1-2(2002)

[山田 02] 山田 日登志，”現場の変革、最強の経営 ムダとり”，幻冬舎，(2002)

[日経メカニカル 99] ”特集 目指せ! 自動車部品のフレキシブル加工”，日経メカニカル，No.541, pp.28-43(1999)

[山脇 98] 山脇 正雄，”技能の世界に光を これがデンソーの技能者教育だ”，日刊工業新聞社，(1998)

[佐々木 94] 佐々木 圭吾，”熟練と量産システムの研究 —日本企業における熟練と量産の共生メカニズム—”，組織科学，Vol.28, No.2, pp.68-78(1994)

[佐々木 98] 佐々木 圭吾，”イノベーションと熟練”，ビジネスレビュー，Vol.45, No.1,pp.180-187(1998)

[日経メカニカル 93] “特集 技能をどう継承するか”，日経メカニカル，1993.4. 5, pp.68-78(1993)

[熟達マシンシステム 94] “熟達マシンシステムの調査研究”，新エネルギー・産業総合開発機構 平成 6 年度調査報告書 NEDO-PR-9408 (1994)

[日本機械学会誌 94] “特集：技術と技能の伝承”，日本機械学会誌，Vol.97，No. 903 (1994)

[機械と工具 95] “特別企画”技術・技能”をどう伝えるか”，機械と工具，Vol.39, No.5(1995)

[川野 97] 川野常夫，”技術・技能の伝承の現状と問題点”，日本機械学会関西支部第 223 回講習会 教材，pp.31-36(1997)

[職業能力開発大学校 98] 職業能力開発大学校研修センター 調査研究報告書 No.92，”高度技能労働者の動向に関する調査”，(1998)

[プラントエンジニア 99] 「熟練技能を次世代に伝える」，プラントエンジニア，2 月号，(1999)

[中小企業庁 00] 中小企業庁編，”中小企業の新しいものづくり IT 時代の中小製造業の展望”，財団法人 通商産業調査会，(2000)

[レイブ 93] J. レイブ，E. ウェンガー，”状況に埋め込まれた学習 正統的周辺参加”，産業図書，(1993)

[ポラニー 85] M. ポラニー，”個人的知識 —脱批判哲学を目指して—”，ハーベスト社，(1985)

[Klocke 99] F. Klocke and T. Krieg, ”Coated Tools for Metal Cutting —Features and Applications”, Annals of the CIRP Vol.48, No.2,pp.515-525(1999)

[関口 01] 関口 徹，”アルミのドライ加工を実現したＤＬＣ工具”，日本機械学会誌，Vol.104, No.995, pp.710(2001)

[福井 01] 福井 康雄，”超微結晶ダイヤモンドコーティング”，日本機械学会誌，Vol.104, No.995, pp.709(2001)

[Klocke 97] F. Klocke and G. Eisenblatter, ”Dry Cutting”, Annals of the CIRP, Vol.46, No.2,pp.519-526(1997)

[Smith 97] S. Smith and J. Tlusty, "Current Trends in High-Speed Machining", Transaction of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, NOVEMBER, pp.664-666(1997)

[松原 02] 松原十三生，" 環境対応加工技術の現状と課題 特集 エコマシニング技術の動向 "，精密工学会誌，Vol.68,No.7, pp.885-889(2002)

[Sheng 98] P. Sheng, et al., "Environmental-based systems planning for machining", Annals of the CIRP, Vol.47,No.1,pp. 409-415(1998),

[中村 98] 中村 肇，" 製造現場における熟練技能の現状 "，計測と制御，Vol.37, No.7, pp.490-494(1997)

[森 95] 森 和夫，" ハイテク時代の技能労働 生産技能の変化と教育訓練 "，中央職業能力開発協会，(1995)

[岩田 02] 岩田 一明，小野里 雅彦，" 技能とものづくり " 自動車技術，(2002)

[Zuboff 88] S. Zuboff, "In the Age of the Smart Machine", Basic Books, (1988)

[職業能力開発大学校 96] 職業能力開発大学校研修センター 調査研究報告書 No.84，" FA 化された生産現場に存在する熟練技能の実態と新たに必要とされる熟練技能に関する実態調査報告 "，(1996)

[ドラッカー 99] Ｐ．Ｆ．ドラッカー，" 明日を支配するもの "，ダイヤモンド社，(1999)

第2章　機械加工における作業遂行の現状と課題

本章では，状況変化への適応能力を有する作業ワークステーションを実現するための課題抽出を目的として，これまで行われてきた研究について検討を加える．まず，熟練作業の分析およびモデル化についての調査・研究について整理する．次いで，機械加工作業の効率化・高度化を目指して行われてきた研究について概観する．最後に，これまでの研究に関する調査結果から導かれる加工作業遂行における課題について示す.

2.1　熟練作業分析の現状

一般的には，熟練作業の特徴として，多様な視点からの作業の評価，利用可能な資源の制約の下での作業遂行，適切な評価尺度の適用，結果としての高精度・高能率な作業遂行，といった点が指摘されている [小関 85]．熟練は作業依存的かつ属人的な特性を有することから，熟練作業者の能力について議論するには，人間が基本的に有する能力に関する分析に加えて，具体的作業を想定した熟練作業者の分析が不可欠である．さらに，80 年代以降盛んに研究されてきた熟練技能の自動化を指向した研究において，熟練技能がどのように捉えられてきたのかについても検討を加える必要がある．そして，作業支援に関連する研究である，人工システムと人間の双方を含むシステムにおける人間の支援に関する研究で明らかになった問題についても整理する必要がある．本節では，まず，これらの研究にについて概観し，考察を加える．そして，従来の研究成果を総合することにより，熟練作業分析の現状について整理する.

2.1.1　人間の作業習熟過程の記述に関する研究

学習研究の変遷　まず，一般的な人間の習熟機能に関する研究について整理する．人間の習熟過程に関する古典的研究として，心理学における行動主義研究を挙げることができる．これは，それまでの心理学が内観と呼ばれる思考の自己観察結果を基にしていたのに対し，計測可能な外部からの刺激に対する反応の変化として人間を記述しようとする研究アプローチである．行動主義研究は，スキナーボックスに代表されるオペラント学習を主要な概念として人間の習熟に対して研究を行った.

また，行動主義研究とは異なる立場の研究として，人間の記憶に関する研究から，記憶の単位としてのスキーマの提案も 1930 年代になされている．この研究は直接熟練を取扱った研究ではないが，学習を重要な概念としている点で，熟練との関連も大きい．また，1950 年代には，人間の運動制御にかかわる考察からベルンシュタイン問題と呼ばれる行為における自由度や文脈のはたす役割に関する指摘もなされた.

行動主義研究は一定の成果をあげたものの 1960 年頃よりその限界が指摘されるようになり，認知革命と呼ばれる一連の研究がなされた．これは，外部から観察可能な情報のみを重視するのではなく，内部状態に対する一定の仮説を認め，情報処理システムとしての分析を重視するという立場の研究である．これに関連する一連の研究は，認知心理学を経て認知科学へとつな

がる研究アプローチである．情報処理アプローチと呼ばれるこの手法は多くの成果をあげている反面，スキルの非言語性，身体性，状況依存性といった点での批判も近年行われるようになった [ポラニー 80][ギブソン 85]．スキルそのものに関する考察としては，社会学で 1960 年代に提案されたハビトス概念を基にスキルの伝承を分析した生田の研究がある [生田 87]．さらに，近年では情報処理アプローチに対する形で，状況論と呼ばれる個人を超えた範囲での分析に注目が集まっている [上野 99]．以下では，代表的な研究について説明した後，人間が基本的に有する学習能力について考察する．

情報処理モデルに基づくアプローチ　行動主義パラダイムへのアンチテーゼとして現れた認知心理学（および認知科学）において取り入れられたアプローチが，人間の思考過程を情報処理システムとして取り扱い,「計算」概念に代表される情報システムの語彙を用いて人間の行動を分析しようという試みである．この試みは大きな成果をあげ，現在における人間の能力分析の基本的な考え方となっている．

情報処理モデルに基づくアプローチでは，典型的には図 2.1 に示すような情報の流れを仮定して，パタン認識，運動プログラム，制御といった問題を個別に研究したうえで全体の統合を考える．即ち，この枠組においてスキルとは，適切なパタン認識処理，高速なプランニング，質の高い解の導出，運動システムの制御性能といった部分問題とその統合の問題として表現されることになる．

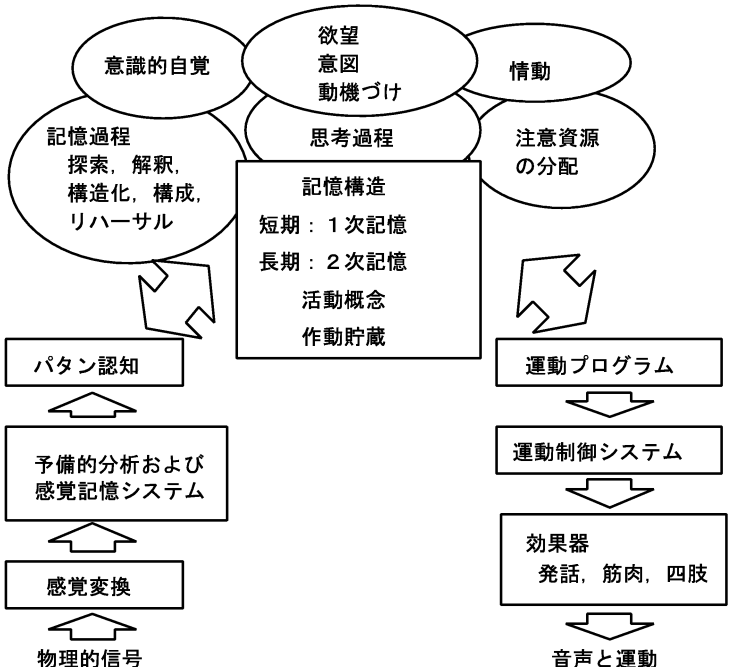


図 2.1 人間情報処理システムの概略図 [ノーマン 84]

運動スキーマ理論　スポーツや楽器演奏などの運動に関わる技能の領域に関しては，詳細な分析がなされてきた．パフォーマンスの習熟曲線に代表される経験的モデルに加え，運動スキー

マ理論 [Schmidt 88] のようなシステム論的なモデル化も示さた．それまで人間の巧みな運動に関しては，まず制御理論的フィードバックモデルによる解明が試みられたが，

- 結果の知識（KR）を基にした学習の説明が出来ない，
- 速い運動において運動制御を行うには人間のフィードバック処理速度は遅すぎる，
- 行為の記憶容量の問題，
- 新たな運動の獲得が説明できない，

といった問題点が指摘されていた．

そこで，習熟した速い運動に関する運動のモデルとしてフィードフォワードモデルが提案された．さらに，記憶容量や学習の問題にはスキーマ理論の主観的強化という概念が導入された．これらの成果を踏まえて，シュミットの提案した運動スキーマ理論にはフィードフォワード，フィードバック，スキーマ理論の 3 つの概念が包含され，運動学習の内的過程の説明としては良好な説明を与えることができるものとなった．この研究から身体的動作を伴う習熟過程に対する知見を整理すると，

- 人間の内的状態を記述するうえで，抽象化されたスキーマ概念を導入することが有効である，
- スキーマとして行為に関するスキーマと知覚に関するスキーマを考える必要がある，
- スキーマの学習の枠組みとして主観的強化という学習概念が必要である，

といった点が挙げられる．

熟練技能のモデル化　小野里らはきさげ作業を対象に，情報処理アプローチの立場から熟練作業者による作業プロセスのモデル化を行った [小野里 98]．

具体的には，熟練したきさげ作業者へのアンケートと作業分析を行った結果，人間の作業遂行において，知覚や運動の単位であるモジュールと作業に関連するイメージが大きな役割を果たすことを明らかにした．この点に着目し，人間の情報処理過程として，図 2.2 のような階層的モデルを提案した．提案した作業プロセスモデルを用いることにより，運動レベルの習熟から知識レベルの学習にいたる，異なるレベルでの習熟を含めた統一的な作業プロセスの説明が可能であることが示された．

脳科学からの知見　認知科学の考え方は，計算論的神経科学と呼ばれる研究領域を介して，脳科学と密接な関係を有すると指摘されるようになってきた．計算論的神経科学は．人間の脳内での情報処理モデルの系統的な構築を目指す研究分野であり，近年，PET(Positoron Emission Tomography : 陽電子放射断層写真撮影) や fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging : 機能的核磁気共鳴画像) といった脳活動状態の観察手法の発展にも助けられ，多大な成果が得られつつある．具体的には，リーチングなどの基礎的な運動に関して，生理学的な分析結果と計算論的な知見の両者を踏まえた脳の情報処理モデルの構築が試みられている．たとえば，塚原らによって提案された人間の随意運動制御のモデルでは，脳内での運動系の順方向モデルと逆モデルの存在が仮定されており生理学的な知見との統合が試みられている．このようなアプロー

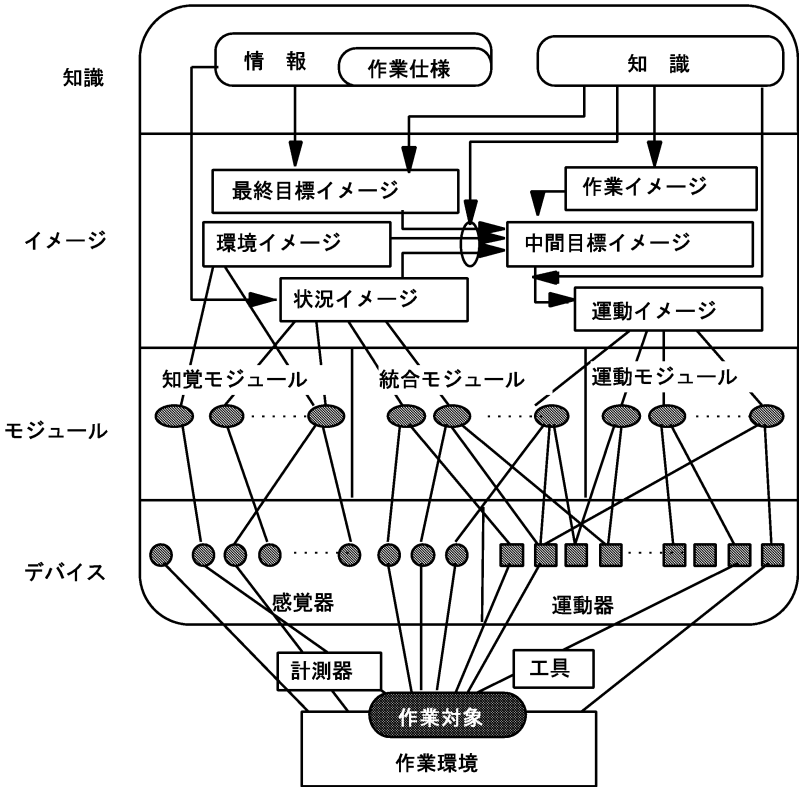


図 2.2 きさげ作業における人間の作業プロセスモデル [小野里 98]

チは，特に，リーチング，発話，眼球運動など比較的機能の解明が進んだ小脳の部位に関して良好な説明を与えることが解っている．また，近年，人間およびサルにおける道具使用に関しても同様のモデルが獲得されているとの報告もなされている [Imamizu 00][入来 00]．さらに，このような脳内モデルの学習方法に関しても，小脳・大脳基底核・大脳皮質でのループ回路における異なる学習方法を併用した学習システムとしてのモデルも提案されており [Doya 99]，運動軌跡の学習のみならず結果からの学習や評価尺度の学習といった高次の学習までを統合した説明がなされている．

以上のような多大な成果にもかかわらず，小脳における機能部位は，現在明らかになった部位に比べてきわめて多数であるので，現在の脳科学の成果では極めて初歩的な動作における学習に関する知見しか与ることはできず，より複雑な行動における運動の統合などに関しては今後の課題である[1]．このことは，脳科学の研究成果から機械加工のような複雑な熟練技能の習熟に対して直接的な知見を与えることはできないことを意味している．しかしながら，操作する対象に対応して何らかの脳内表現が経験に基づいて生成されている可能性が高いという事実は，本研究が対象とする作業者支援にも大きな示唆を与えるものである．特に，近年注目されているミラーニューロンの存在 [Gallese 98] は，対象理解において自らの行為の果たす役割が大きいことを示す事例として注目される．これは，作業対象への直接的な行為体験が対象を把握するうえで大きな役割を果たすという可能性を示している．これらの研究成果は，今後，プ

[1]川人は，このようなモデル学習の枠組みが言語やコミュニケーションといった高次機能でも用いられている可能性を示唆している [川人 96].

ロセスから作業者の隔離が進むと考えられる機械加工において，いかに作業者の具体的行為体験を維持するかが大きな課題となることを示唆している．

認知心理学からの知見　認知心理学分野における熟達研究では，領域固有の構造化された知識として，行為に埋め込まれた知識を重視すると言われている．これは，エキスパートシステム研究においてなされた，数多くの熟練研究が十分な成果を挙げなかったことから，熟練作業者による問題解決過程を，基礎的で領域を越えた一般性を持つ処理を用いた発見的探索の過程と捉えた理論によって取り扱うのは困難であるとの立場を取っているからである [大浦 96]．即ち，単に，情報の入出力，消去，変換，生成などの概念で人間の内的処理過程を記述するだけでは不十分であり，どのような情報の内容が活用されているのかといった点に焦点が当てられるべきとの立場と言える．

このような視点から，大浦は熟達者の特徴として，

- 認識におけるチャンキング，行為における自動化などの下位技能の習熟が達成されている，
- 外的世界と内的世界の対応をつけることができ，問題解決のための知識が獲得されている，
- 遂行の評価基準の獲得および自己状態の評価基準の獲得と調整により適切な評価基準が獲得されている，

といった点を指摘している．

また，波多野らは，知識・技能の柔軟性・適応性のレベルによって熟達者を，定型的作業に対して高度なパフォーマンスを発揮する手際のよい熟達者 (routine expert) と，状況の変化に対応して適切な解を導く適応的熟達者 (adaptive expert) の 2 つのクラスに分けて考えることを提案している．

熟練の５段階　知的作業に関するスキルの代表的な分析としては，表 2.1 に示すドレイファス (H.L. Dreyfus) によって行われた人工知能批判 [Dreyfus 87] のなかでの，ビギナーからエキスパートへ至る５段階（ビギナー，中級者，上級者，プロ，エキスパート）の能力獲得に関する分析が挙げられる．この分析では，上級者までは程度の差はあれ，合理的とよべる意思決定が行われているか，少なくとも行動を合理的に説明できるものの，プロとエキスパートのレベルでは，対象に対して主観的に過去の経験との類似性を認め，直感的，全体的な認知による行動を行っているとしている．そして，推論マシンでは実現できないエキスパートの特徴として，状況依存性，経験に基づく視点の選択，状況に没入することの重要性，などが指摘された．

人間の作業習熟過程研究からの知見　以上の結果を整理すると，人間の作業習熟に関するこれまでの知見として，以下の二点としてまとめることができる．

- 人間の内的状態記述のための機能単位を導入することで人間の能力に対する合理的な解釈が可能となる．
- 人間の内部にある機能単位群と外的世界との柔軟かつ精緻な連携の獲得が習熟において重要である．

表 2.1 エキスパートの 5 段階 [Dreyfus 87]

能力段階	認知要素	視点	判断	関心度
ビギナー	文脈不要	なし		・状況を客観視
中級者	文脈不要と状況依存	意識的選択	分析的	・状況把握は客観的 ・判断は客観的 ・結果に主観的関心
上級者				
プロ		経験に基づく		・状況に没入して事態を把握 ・判断は客観的
エキスパート			直観的	・判断は客観的 ・状況に没入

ここで，人間の内的状態を情報処理システムに模して議論することに対する本研究の立場を示す．情報処理アプローチに対しては，アフォーダンス [ギブソン 85] や状況論 [上野 99] の立場からの批判があり，暗黙知に関する議論からは，人間の内的状態の全てを表象化することが困難であることの指摘もなされている [ポラニー 80]．これらの立場は，問題点の指摘という立場を超えて情報処理アプローチそのものを否定する意見として取り上げられることもある．本研究では，アフォーダンスや状況論の立場からの指摘には内部モデルと外界との整合的で密接な関係の必要性を指摘したものであるとの立場を取る．そして，暗黙知の議論からの指摘に対しては，そもそも本研究は暗黙知を外在化しようとしているのではなく，作業概念として内部状態を仮定しているのであって，内的状態の外在化できないものとして暗黙知をとらえる．さらに，生態心理学 [佐伯 86] が指摘する行動の非事前決定性の指摘は，システムの継続的な再構成が不可欠であることを意味しているものと理解する．

このような立場を取るのは，シュミットや小野里による説明モデルが有効に機能していることと，計算論的神経科学での川人らの取り組みの成果をふまえると，情報処理アプローチを基本的な立場とすることが妥当であると考えるからである．ただし，情報処理アプローチの多くが，人間の内的な情報処理構造の記述に主眼をおいているのに対して，本研究では，加工プロセスを含む人間－工作機械系としての作業構造のなかでの，人間の内的状態について注目している点が異なる．このように分析対象として人間の解剖学的身体に限定しない点は，状況論やアフォーダンス理論などと問題意識を共有しているといえる．

2.1.2 現存する熟練作業の能力記述に関する研究

熟練技能に対する調査 1980 年代以降，熟練技能の枯渇への危機感や，人間の高度な能力に対する知的興味の高まりなどに起因して，現存する熟練した人間の能力記述に関する研究が数多くなされてきた（例えば [職業能力開発大学校 96]）．手法としては，インタビューやアンケートを基にした分析や実際の作業遂行を観察してモデル化する手法が，産業心理学，職業教育，認

知心理学の各分野で研究されてきた [職業能力開発大学校 95][大浦 00]．技能者への調査としては，熟達マシンシステムに関する調査 [NEDO 94] や職業能力開発大学校を中心として行われた調査 [職業能力開発大学校 01] などがある．以下では，それぞれの調査結果のうち，本研究に関連する部分について示す．

「熟達マシンシステムに関する調査」[NEDO 94] は，産業界において存在する熟練作業に関して，自動化が進まない理由についてのアンケート結果の報告である．現在でも熟練作業に依存度が高い作業としては，個別受注タイプの生産が顕著であることを示すとともに，機械化・自動化をしていない理由は，投資効果が期待できない，作業者のほうが優れいている，熟練者に依存するしかない，など，人間のパフォーマンスの高さに起因することを明らかにしている．

「FA 化された生産現場における熟練技能に関する調査」[職業能力開発大学校 96] は，生産現場に普及した FA 機器と技能の関係についてのアンケート結果である．アンケートから分かることは，FA 機器は，省人化，品質の安定と向上，生産性・コスト低減などを目的として導入したにもかかわらず，品質の安定に対する効果しか得られていないということである．その他の目的に関しては，設備保全作業の発生，機器操作教育コスト，生産の柔軟性の低下，作業者の技能の低下，などの理由から省人化は思ったほど進んでいない．結果として，新たな自動機器製作のための技術開発，ばらつきへの対応，小ロット化への対応，工具および品質の管理・保全，仕様変更への対応といった部分に関してはいまでも熟練技能に依存していると報告されている．

「高度熟練技能教育に関する調査」[職業能力開発大学校 01] は，能力開発プログラムを開発するために，技能内容とその形成過程について調査した結果である．ここでは，固定的な技の転移ではなく道具の変化に伴う継続的な技の進化を目的としたカリキュラムの作成を主眼におくべきであるという立場をとっている．熟練作業者にとって必要とされる能力として，以下の 6 つの能力が抽出されている．

- 作業する能力（とくに工程ごとの段取り）
- 作業状況を捉える感覚
- 判断する能力
- 関連部署との調整能力
- 新たな工夫を生み出す能力
- 技能を伝承していく能力

また，アンケート結果から明らかになった近年の特徴として，

- すべてを自作するのではなく，既製品と独自開発をうまくバランスする能力が必要となっている，
- 標準的な作業の自動化が進んだため，基礎的な作業を行いながら技能を獲得することが困難な反面，通常の機械では行えない高度な仕事が増えている，

が挙げられている．

さらに，小松原による技の認知的なモデル化のために行った職人へのアンケートでは，共通して指摘されることとして，1) 作業対象と対話する，2) 自ら研究する，3) 手先の器用さの諸項

目は必要であるが，十分条件ではない，といったことも報告されている [小松原 00]．ここで，1)〜3) はそれぞれ，作業対象の状態変化への対応，よりよい対象との対話の仕方を探求しつづけること，器用さそのものよりも，その器用さをどのように使い，発展させていくかのほうが重要であることを意味する．そして，職人の仕事を構成するものとして,「対象の観察力」「理想の状態に近づけるための方法を選んだり，考えたりする計画力」「手先の器用さ」の３つの能力を挙げている．

熟練技能の観察　アンケートやインタビューの持つ問題点として，明示的に外在化できる事柄に偏った結果となる可能性があることがある．たとえば，本人にとって当然であると思っていることを抽出することは困難である．そこで，作業者を外部から観察し，その能力を明らかにする研究も行われている．

代表的なものとして，生産現場での技能の解明や伝承に関する産業心理学での取り組みが挙げられる．森は，[職業能力開発大学校 95] において，まず技能の習熟段階ごとでのアンケートと基本的な能力テストの結果を因子分析し，能力の階層構造を求めた．そして，各段階での能力群の変化について検討を行った．

この検討の結果として，生産にかかわる技能について，以下の結論を述べている．

- 生産にかかわる技能は，大きく感覚運動系の技能と知的管理系の技能に分類できる．
- 感覚運動系技能においては，技術的知識に関する能力と実技に関する能力は分離して観察され，作業段取り能力が重要な機能を有する．
- 知的管理技能においては，技術的知識にかかわる能力と実技にかかわる能力は融合して見出され，基本的な概念の理解が重要である．

森によるスキルの能力構造化過程の分析を図 2.3 に示す．この研究では，外的に観察可能な情報を最大限に使い，内的なメカニズムに関するアドホックな過程は極力導入していないので，分析に恣意的な要素が少なく結果の信頼性も高いと言える．一方で，人間にどのような変化が起きているのか？何が変わることにより能力が向上したのか？といったメカニズムに関する検討を行うことは困難である．

さらに，森はIT 化が進む生産の場における，教育のあり方について述べた著書 [森 95] において，今後必要とされる技能について，生産の手段・方法に関する知識を有しつつ生産の直接的行為領域の技能を有することとしている．これは，ドラッカーが指摘するテクノロジストと近い作業形態であり，今後の技能労働のひとつの指針を示していると考えれられる．また，機器のハイテク化が進むにつれ，知覚運動系のスキルを習得することが困難になると考えられるので，今後の技能教育においては，体験に基づく主観的評価基準を付与することと，獲得した基準を他者と共有できるようにすることが課題であるとしている．これは，日経デジタルエンジニアリング誌によって行われたアンケート結果とも符合する内容である [日経デジタルエンジニアリング 02]

以上のようなある程度広範な技能を対象とした議論の他に，個別に作業対象を絞った技能の分析も行われている．

自動車業界を対象に行われた分析 [森 93] においては，生産技能の内容として，保全および修理，段取りおよびセッティング，機械の使用，が抽出されている．そして，必要となる能力と

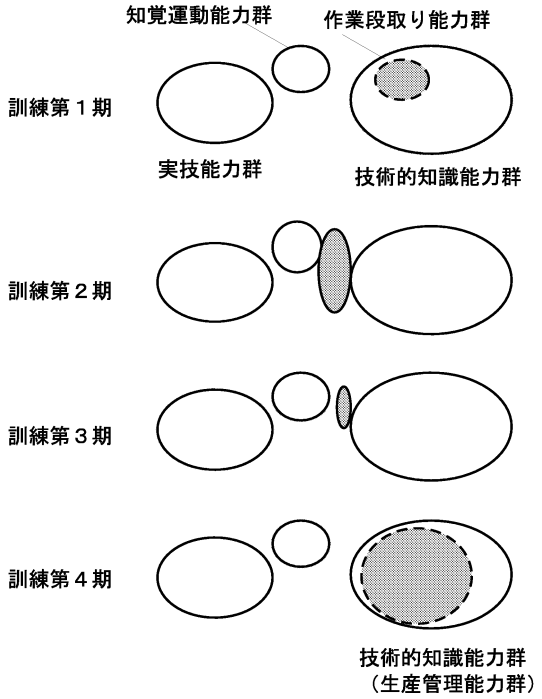


図 2.3 能力構造化過程の分析 [職業能力開発大学校 95]

して，状況判断・解析能力，他の労働者との協調，専門知識の理解能力，作業条件の設定と異常対応能力，が挙げられている．これら，高度熟練技能の特徴として，

- 生産物が優れている，
- 技能遂行課程が効率的である，
- 事前に十分計画（段取り）されている，
- 他者の評価が出来る，
- 生産物から技量（プロセスのよしあし）を推定できる，

が挙げられている．

金型加工を対象としては，例題に対する解決法のアンケート調査を通して，熟練技能の調査が行われた [三好 01]．この結果としては，

- 作業者ごとに解決案に個人差がある，
- 熟練者は，CAD/CAM はあまり使わず，従来の方法にこだわりがちである，
- 熟練者ほど，実加工時の状態認識が可能であり，適応的な修正を前提に作業設計をしている，

などが明らかにされた．

作業者ごとの個人差に関しては，工程設計における熟練技術者の思考過程に関する研究においても報告がなされている [井原 98]．この研究は，問題解決において考慮すべき項目の優先順序という形で，作業者の問題解決パターンをモデル化している．抽出されたモデルを比較した

結果，熟練作業者間においても，作業者の属する生産文化により優先関係が異なることが示されている．

また，油圧ショベルなどの機械操作時における認知能力に関して，熟練者と未熟練者の違いを情報の利用という観点から分析した研究も行われている [藤田 02]．作業者の能力に関連するこの研究の結論としては，以下の特徴が報告されている．

- 熟練作業者は作業時には視覚・聴覚・力覚への情報を基に作業を行っている．
- 未熟練作業者は，複数感覚器への情報を同時に有効利用できず，視覚情報に頼って作業を行いがちである．

さらに，人間－機械系における人間の訓練システムに関する研究では，学習を促進する効果を有するものとして，作業状態のフィードバック [末長 98] 以外にも，聴覚刺激による注意喚起 [末長 00] なども効果があることが報告されている．

熟練作業の能力記述研究からの知見　以上の調査をまとめると，まず，熟練が極めて個人差の大きい過程であることが分かる．そして，熟練技能が求められているのは，定型的な作業におけるパフォーマンスではなく，保全や段取りなどの非定型作業において柔軟性を有して対応することであり，新たな状況を想定して対応する能力が求められていることが分かった．さらに，新たな状況への対応能力を実現するためには，一般的な知識と作業者自身による実際の行為体験との融合が重要であることが分かった．

2.1.3 熟練作業の人工的実現を指向した研究

一般の生産活動では，熟練作業の自動化は作業プロセスの見直しや再構成により，熟練作業が不要な工程への置き換えをする場合が多い．しかしながら，様々な制約から，熟練作業を別のプロセスで置き換えるのではなく，作業レベルで自動化しようとする研究も数多く行われてきた．これらの研究としては，人工知能やロボティクスのように一般的な知能実現のための方法論を基にスキルを取り扱うアプローチと，個別の熟練作業の分析・機械化からのアプローチがなされてきた．

人工知能研究から派生した知識工学では熟練者の有する知識・ノウハウに対して，そこに含まれる論理などを記述・利用するエキスパートシステム研究が数多くなされた．用いられる手法も，一階述語やフレームなどの適用の後，ファジィ論理やニューラルネットワークなどのソフトコンピューティング技術の適用なども行われた．しかしながら，第 2.1.1 節で述べたように，このようなアプローチが成功するためには，実際の作業に対する十分な知識の構造を反映する必要があることがわかり，近年では，知識の内容記述に関する議論が進められている [溝口 97]．

岩田らは，工程設計を対象として，ノウハウを基にした知識ベースシステムの形で熟練作業者を捉えた [Iwata 89]．ここでのノウハウの抽出においては，アンケートだけでは，経験的知識が強調されるとの理由から，背景知識に関しては別途用語に関する知識を付加したシステムも開発されている．この研究では，状況に応じた柔軟な決定順序の設定が工程設計において重要であると指摘されている．

ロボティクス研究においては主に力学的解析を基にした取り組みがなされ，挿入作業に対する RCC（Remote Center of Compliance）の利用やインピーダンス制御の枠組みでの技能移転の研究が大きな成果をあげた [浅田 90]．また，きさげや金型磨きに代表される数多くの個別的な熟練作業を対象とした自動化研究 [山根 95][森口 96] が行われたが，これらの研究から一般的な方法論が導出されるには至っていない．

以上見てきたように，人工的実現を指向した立場から熟練技能を取り扱うと，事前に前提条件や対象範囲を記述の枠組みとして規定する必要があり，その枠組み自体の更新に関しては議論されることが少ない．これは，収束的課題に対する定型的熟達者 [大浦 96] の分析・自動化には十分であっても，発散的課題に対する適応的熟達者の能力分析には不十分であると言える．

2.1.4　人間を含む系での作業遂行に関する従来研究

作業者と作業プロセスの間に何らかの人工システムが存在する場合にどのような機能を実現することが有効な支援となるのかについて整理するために，以下では，人間を含む系における作業遂行に関して従来行われてきた研究例を示したのち，適応的作業遂行のための課題をまとめる．

パワーアシスト　まず，物理的世界での作業を支援する試みについては，研究レベルではいくつか報告されているが，実用レベルでは能動的に駆動する部分を有する機器には法令上の制約があることや，安全性の確保の問題から，山田らが提案するスキルアシスト [山田 02] など少数の例があるのみである．米国でも自動車業界において受動的なパワーアシスト機構の開発が行なわれてる．これらは全て，工場における肉体労働の支援に特化したものであり，作業の計画や判断など高次の作業との統合については検討されていない．

生態学的インタフェース設計 (EID : Ecological Interface Design) [Vicente 90]　生態学的インタフェース設計とは，K. Vicente と J. Rasmussen により提唱された，各種の自動化装置が介在する複雑な人工物システムに対するオペレータの情報処理負荷を軽減するインタフェース設計のための設計原理であり，Rasumussen が提案する人間の情報処理におけるスキルールールー知識の 3 層からなる梯子モデルをもとにしている．これらの設計原理により，対象システムとの間に介在するコンピュータの存在をオペレータに意識させないことと，オペレータが情報の統合や推論に対する労力をかけなくてもよいことが実現されると期待される．そして，オペレータが直接対象を操作する感覚を実現することを目的としている．

この研究は，行為に対する対象の挙動を知ることが適切な作業遂行には不可欠であることを示している．

監視制御 (Supervisory Control)[Sheridan 92]　監視制御は T. Sheridan により提案された人間機械系システム設計の枠組みであり，人間が計算機を介して作業を行う場合のシステム構成論を展開している．この研究は 1960 年代より行われており，様々な応用がなされているが，代表的なアプローチしては，人間の作業のフェーズを，計画（plan)，教示 (teach)，監視 (monitor)，介入 (intervene)，学習 (learn) の 5 つに分類し，これらのフェーズの循環として作

業遂行をモデル化している．そして，各フェーズで行うべき内容について整理した後，人間と機械の間での機能分配について議論を行っている．なお，監視制御において用いられる計画 (plan) は，本研究で使用する計画とは指し示す内容が違い，資源制約や目的の理解から戦略の設定などを指す．本研究の計画に近い概念は，監視制御においては，教示 (teach) に近い．

この研究から分かることは，自動的に動作するメカニズムを含む系においては，作業遂行段階に応じた分析と設計が必要であるということである．

拡張現実感技術 [Azuma 97] 拡張現実感技術 (Augmented Reality: AR) は，仮想現実感技術を基に発展した技術であり，実世界を情報的に強化することにより作業者に対してより高度な状況認識・状況理解をさせることを目的とする．実画像上へのオーバーレイ技術による情報付加などが代表的な適用例であるが，環境に存在する特定の周波数の音をキャンセルすることにより作業対象をより理解できるようにするといったマルチモーダルな展開が期待される．しかし，過大な情報は必ずしも作業者に対して有効な支援とはならないことから，どのような情報を提示すべきか？という点に関しては，個人差の問題など解決しなければならない課題も多い．

意思決定支援 [飯島 93][支援基礎論研究会 00] 意思決定支援は，半構造化問題に対して，問題処理や知識適用を行うことにより作業者に支援情報を提示する技術の総称であるが，効果の評価や副作用の問題など解決すべき課題は多い．意思決定研究は一般に様々な応用範囲を有しており，その全体像をここで示すことは適当ではない．ここでは，Kidd による，技能拡張技術 (Skill Enhancing Technology) の提案のなかで指摘されている意思決定支援について述べる [Kidd 92].

Kidd は，今後のシステム設計のあり方として，システム利用者の嗜好に合ったシステムの構築の重要性を指摘した．そして，このようなシステムにおいては，評価的意思決定支援 (Evaluative Decision Support) と生成的意思決定支援 (Generative Decision Support) の両方の意思決定支援技術の適用が不可欠であるとしている．前者は，支援者に対して，行為の予測を提示する支援であり，後者はどのような行為を行うべきかの候補を提示する支援である．

この指摘の示唆するのは，断片的な作業者支援ではなく，作業を一貫して評価し，支援技術を適用することが必要であるということである．

断片的な知識の共有手法 大規模な問題に対して，複数の行為主体が協調して問題解決を行う研究としては，分散人工知能 [石田 96]，マルチエージェントシステム，多領域最適化 (Muli-Disciplinary Optimization: MDO) などがある．これらはにおいて共通するのは，創発的秩序形成を想定せず，合目的的に断片的な部分問題解決器群が協調するためには，なんらかの部分問題解決器をつなぐ媒介と管理機構がが必要であるということである．

適応的作業遂行のための課題 ウィノグラードは，グループウエア研究の端緒となる著書 [ウィノグラード 86] において，人工知能の限界を指摘し，人間の支援に関する研究の重要性を指摘している．この著書の中で，人間のエキスパートの特徴として,「単に出来合いの問題を解決するだけではなく，それをより広い文脈から理解できる深さを持った人」と指摘している．

また，ブルンズヴィック (E. Brunswik) に代表される生態心理学の影響をうけたアプローチでは，人間の習熟において，事前に規定される固定的な情報の関連付けとして捉えるのではなく，環境の中に存在する手がかりの中から対象の理解へとつながる関係の生成を重視している [佐伯 86][Kirlik 99][石塚 01].

これらの指摘は，熟練作業者の能力が必要とされる高度な作業においては，事前に規定された問題解決の枠組みをなぞるだけでは不十分であり,「どのような情報を考慮するか？」といった問題の認識に対する再設定を含めて検討することが必要であることを示唆していると考えられる．また，習熟を伴った作業に対して支援を行うためには，システムを長期間にわたって使用し続けることが不可欠であるので，この意味でもシステムのカスタマイズは重要であるといえる．

2.1.5　熟練作業分析の現状と課題

多くの技能研究に共通した問題意識として，今後のものづくりの現場において，発散的課題に対応可能な問題の捉え方自体を再構築するための支援技術が課題として挙げられる．そして，熟練作業および人間を含む系における作業分析の結果によると，このような作業において必要とされる作業者の能力について，以下の能力に着目しているのが現状と言える．

- 新たな問題に対して，問題の枠組みを再構成して解決する能力.
- 作業遂行にあたって，知識の強化・拡張をしながら作業をする能力.
- 問題を全体として一貫して取り扱う能力.
- 実世界の状況に応じて実際に計画の実行・評価を行う能力.

そして，以上の能力を有している現在の熟練作業者の記述には，知覚や行為に関する機能単位をもとにした情報処理アプローチを適用することが有効であることが分かった.

以上の研究は，作業を行う側からの分析についての研究であった．以下では，作業される側である切削プロセスの分析を基にした研究について概観し，これらの研究によって本節で指摘された課題に対して対応可能かどうかについて議論する．

2.2　加工研究の現状

これまでに，加工に関する研究は数多く行われ，その結果，工作機械の基本性能の向上と明示的な作業指令に基づく作業遂行を実現してきた．これらは，属人的な技能に依存しない作業範囲の拡大を主な目的としていた．すなわち，現在までに行われてきた加工研究の多くは，機械操作に関わる技能の技術化の試みであったと言える．これらの研究では，作業者の関与をできるだけ少なくすることを目指して，a) 工作機械の精度や剛性の向上や工作機械設計法の効率化，b) 製品の設計情報を基にした自動作業設計に代表される加工ステーションのシステム化，c) 加工状態の自動監視や無人化対応，などを指向していた．そして，これらの研究結果は，大量生産における自動加工の精度・能率の向上に寄与してきた．近年では，工作機械の制御装置がオープン化されたことにより，システム開発が容易になり，作業設計，実時間制御，監視，検

査などの機能との統合化システムの構築も行われている [Yamazaki 97][成田 02]．さらに，現在でも多くの自動化研究が継続さており，定型的な作業遂行者としての機械操作オペレータの必要性は減少の方向をたどっている．

以下では，本研究と関連の深い，加工プロセスのモデル化，作業設計，加工状態認識に関してこれまでの研究を概観する．

2.2.1 加工プロセスのモデル化に関する研究

加工プロセスに関しては，様々な視点からのモデル化が行われてきた，以下では，工作物の形状変化のモデル化，物理現象のモデル化，工作物把持のモデル化，加工誤差のモデル化について整理する．工作物の形状変化のモデル化とは，主に工具経路の幾何学的な評価を目的としたモデル化であり，工作物と工具掃引形状を幾何モデルで表現し，それらを集合演算することによって加工を幾何学的に評価することを目的とする．また，物理現象のモデル化とは，工具と被削物の相対関係や加工条件を入力として，切削理論に基づいて加工時に発生する切削力，摩耗，びびり，切削熱などの物理量を求めるためのモデル化である．ここでは，物理現象のなかで，切削力，切削熱，びびりに関する研究を主対象とする．また，プロセスモデルのパラメータ決定に関しても従来の研究例を整理する．

工作物の形状変化のモデル化　切削過程での形状変化に対する研究は，Wang による工具掃引形状の定式化 [Wang 86] に始まり様々な形状表現を基にした研究が行われている．これらの研究の主な違いは，幾何形状の表現手法の違いであり，目的に応じて様々な形状表現が用いられている．以下では，まず，これまでに提案された形状表現について概観する．

現在までに，様々な幾何モデルが発表され，CAD の領域では実用化も進んでいる．これらの中で，加工シミュレーションに関する代表的な研究として，1. Decomposition Model (図 2.4(a))，2. Boundary Representations(B-rep) (図 2.4(b)) ， 3. Constructive Solid Geometry (CSG)(図 2.4(c))， 4. Point-Vector Technique(図 2.4(d)) があげられる [木村 87] [Jerard 89]．これらのうち，1., 2., 3. は CAD の分野で提案されたものであり，4. は除去加工シミュレーション用に開発されたものである．

以下これらの手法について述べるとともに，ボールエンドミル加工への適用を含めた高精度な幾何シミュレーションへの適用可能性について検討する．

(a) Decomposition model

図 2.4(a) に示すように，空間をあらかじめ定められた基本要素の集まりで分割し，立体の占める部分を指定するもので各種の方式が知られている．基本演算が単純で一様，理論的に明快であるが，一般に形状表現は近似となりデータ量が多くなる．

(a-1) Mesh Model

図 2.4(a-1) に示すように，形状を 3 次元のブロックメッシュに分割し，各メッシュにその部分のローカルな情報をもたせブロックの積木細工のようなモデルとして表す方法である．ブロックの大きさによって近似の精度が決まるので，精度を高めるためにはメッシュを十分小さくしなければならない．その結果，情報を保存するためのメモリが膨大

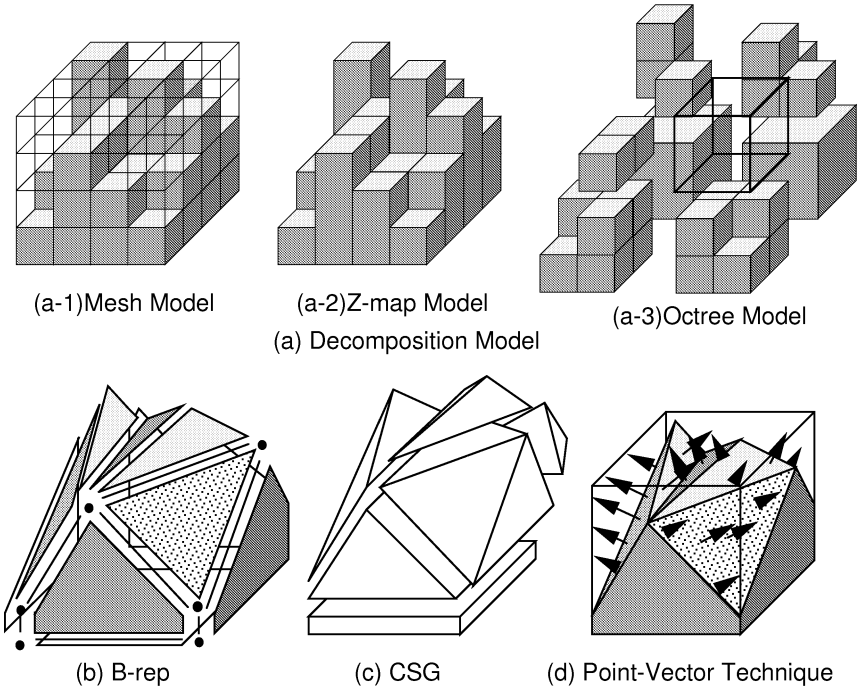


図 2.4 幾何シミュレーションにおける形状表現

になりがちである．一方，非常に微小な集合演算に対してもこちらが定義した解像度の範囲で安定に計算を行うことができると言う利点がある．

また，Mesh Model は単にブロックを積み重ねただけであるが，各ブロックが on か off かの情報だけではなく，ブロックの各頂点にフラグを持たせ，フラグの組合せによって用意されたパッチを当てることによって Mesh Model より滑らかに表示できるようにしたり [Lolenson 87]，各 VOXEL の質量と隣接 VOXEL の状況から同様の結果を得るもの [岸浪 89] などがある．この方法では記憶容量の制約から，カスプ等の微細な形状の評価が困難である．

(a-2) Z-map Model

図 2.4(a-2) に示すように，水平面に平行な基準面を 2 次元のメッシュに分割して各メッシュがそれぞれの高さ情報を持つことによって立体を表現する．この方式には，データの記憶が簡単であるという長所がある．また，3 軸加工を対象とする場合，工具との干渉計算は高さ情報の比較だけでよいので計算量が少なくなることも利点としてあげられる．しかし，水平方向の精度を十分に保つためにはメッシュを十分小さくする必要があり，とくに高さ方向が急変する形状の表現には課題を有する．この欠点を克服するために，複数方向からの情報を保持することで表現精度を向上させる試みがなされている [藤尾 00]．

(a-3) Octree Model

図 2.4(a-3) に示すように，ブロックの分割を Mesh-Model のように均一に行うのではなく，ブロックの大きさを変えて効率的に配置するようにする方法である．全体の形状を立方体の中に収め，これを 8 分割して行くことによってブロックの大きさを決定する．しかし，エンドミル加工では，加工物表面全体を加工することが多く，Octree 表現を用

いる効果は小さい.

(a-4) Z-buffer algorithm

陰線処理に用いられる Z バッファ法を拡張したもので，Z 方向の視線と交差する物体の全ての Z 座標を持つことによって物体を表現する．切削の過程は，物体と工具軌跡の包絡面との集合演算によって表される．この方法はもともと画像処理に用いられた方法を拡張したもので，容易に切削の途中形状を表示することができる．一方，視点の方向による近似誤差が大きくなるという欠点がある．この近似誤差を，小さくするためには，膨大なメモリが必要となる．

(a-5) P-map[呂 90]

Z-map 法を改良して各メッシュがどの図形に属しているかをポインタで記憶することにより，格子点以外でも精度よく物体を表わす手法である．基本形状の演算として和，差，積などが用意されている．表現精度は向上するものの演算速度は Z-map より遅くなる．同様のアプローチとして，各格子点が近傍での近似関数を保持する G-buffer[Saito 91] も提案されている．

(b) Boundary Representations(B-rep)

図 2.4(b) に示すように，立体を規定する境界により表現する．立体の頂点，稜線，面などの関係を表わすデータ構造を持つ．表示データや応用で必要となる形状データをほとんど直接的に得ることができる．しかしながら，一般に処理は複雑になり，接する物体同士の集合演算が困難になるという問題がある．加工シミュレーションでは，工具経路に沿って掃引形状を計算する必要がある．この計算においては，非正則な集合演算が必要になることが多く処理が困難になる．特に，ボールエンドミル加工では曲面同士の干渉計算が必要になるので，処理がさらに複雑になるという問題がある．

(c) Constructive Solid Geometry(CSG)

図 2.4(c) に示すように，基本立体あるいは基本曲面を，種々の操作で結合して立体を表わす．表現が簡潔で，他のモデルへの変換が可能である．一方，必要なデータを導出するまでに時間がかかることが多い．また，多様な初期形状を表現するうえでは，制約が大きいことも加工シミュレーションへの適用においては問題である．

(d) point-vector technique

図 2.4(d) に示すように，工作物を最終形状面と面の方線ベクトルで表す方法である．すなわち，除去される領域を法線ベクトルの集合で表すことになる．そして，法線ベクトルの大きさを工具軌跡の包絡面と交差するごとに，交差点までの大きさに変更すれば，切削過程は工具軌跡の包絡面とベクトルとの交差によって表わせる．この方法は加工による削り残しは直接求めることができるが，切削の途中形状の評価が困難であるため，物理シミュレーションを行うことができない．したがって，このモデルは本研究には適さない．

以上示したように，これまでに開発された切削加工の幾何形状に対する表現を概観すると，90 年代に入るまでは，計算機の表示能力の問題から Extended Z-buffer などの手法も用いられた [Takata 89]．しかしながら，近年の画像表示装置の高機能化に伴い，表現精度とシステム構築コストへと評価の重点が移っている．汎用のモデリングツールをも基したもの

[山崎 92][El-Mounayri 97] や，画像処理用のハードウェア機能を積極的に使うことによりシミュレーションの高速化を図った研究も報告されている [乾 99].

物理現象のモデル化　切削加工は力学的には大ひずみ，高ひずみ速度の下での摩擦を伴う材料の破壊現象と考えられ，加工の様子を純粋に力学的な方法でシミュレートする事は非常に困難である．そこでいくつかの近似を用いて問題を単純化して，切削過程を理解しようとする試みがなされてきた [臼井 90]，しかし，これらのモデルにはそれぞれ一長一短があり，個々の問題に対して使い分けられている．

切削中に発生する物理現象のうち，十分な再現性を持ってモデル化されている現象は，切削力，切削熱，びびり振動である．ここでは，これらの研究についてまとめる．

- 切削力

  エンドミルは複雑な切れ刃形状を有しているため，解析的な切削力のモデル化が困難である．そこで，Kline ら [Kline 82] は，スクエアエンドミルに対して，切れ刃を微小領域に分割し，個々の微小切れ刃ごとに簡単な切削モデルを適用して切削力を求め，それらを合成することにより全体の切削力を求める手法を提案した．このモデルは，切りくず内の塑性変形仕事などを無視することに相当する．Kline のモデルはきわめて簡便であるため，現在でも広く用いられている．このモデルの拡張として，工具変形による切削力の減少を含めたモデル [Smith 91]，工具取り付け時の偏心を含めたモデル [Armarego 89]，スクエアエンドミルの高速切削時の切削モデル [Fuh 97] などが提案されている．

  また，これらのモデルは簡便に計算できるため，幾何シミュレーションに連動して，加工に伴って変化する形状に対応した加工条件での切削力評価が行われた [Takata 89]．近年では，計算機およびネットワーク環境の進歩により，これらのシミュレーションをパーソナルコンピュータ上で行った例 [成田 00] や，インターネットを介してサービスを提供する例 [Ong 02] なども報告されている．

  さらに，このような切れ刃の分割を基にした手法は，ボールエンドミルへと拡張されて適用された [藤井 88][Yang 91]．また，ボールエンドミルの切削力予測においても，工具の偏心を考慮した解析や [Tai 94]，工具の柔軟性を考慮した解析も行われている [Sim 93]．

  しかしながら，このモデルに基づく解析が妥当な解を得るためには適切なモデルパラメータを事前に準備する必要がある．特に，ボールエンドミルは加工時の切れ刃の作用位置により切削状態が大きく変動する．したがって，比切削抵抗などのモデルパラメータの推定が重要な課題となる．

  また，切削理論をできる限り厳密に用いる方法としてエネルギ解析法が提案されている [臼井 90]．これは，切屑流出角が切削エネルギが最小になるように決定されると仮定して，幾何学的な条件とエネルギのつりあい，2 次元切削データから 3 次元切削の切削力等を求める方法である．

- 切削熱

切削に伴って発生する切削熱が工作物内部に伝わって熱膨張することにより生じる加工誤差に対する研究は，有限要素法などの伝熱問題として定式化されている．これらの解析は最終的に，工作物の熱変形を求める加工誤差の推定手法として提案されている [帯川 92]．さらに，切削に伴う形状変化を考慮した解析 [Moriwaki 95][松村 97] も報告されている．

これらの解析において重要となるのは，工作物表面での熱伝達率の推定と，切削仕事のうち工作物に吸収される熱源の分配率の設定である．

また，切りくずの堆積やクーラントの影響などのように個別事例ごとに変化の大きい要素は，現在の解析の枠組みでは対応が困難である．

- びびり

  加工能率を向上させる上で，びびり振動は大きな問題である．この問題に対しても，まずスクエアエンドミルを対象として研究が行われた．古典的には，工作機械の動剛性を基にした安定限界の分析などが行われてきたが，形状シミュレーションと連携させた再生効果の分析 [Tsai 91][Weck 94] も行われた．さらに，低剛性工作物のびびり判定 [Altintas 92] やボールエンドミル加工でのびびりのモデルと安定解析 [Abrari 98] も報告されている．

工作物把持のモデル化　工作物把持に関しては，当初，工作物を剛体として仮定し，運動学的な制約をもとに把持の可能性を評価する研究が行われてきた [Asada 85]．しかしながら，加工対象物の低剛性化が進むにつれ有限要素法を用いた変形解析が行われるようになった [Lee 87]．工作物との接触領域が小さいと仮定できる球状ロケータでは大きな問題にならないものの，一般に用いられるバイスや把持具では，接触面での応力分布をどのように推定するかが大きな課題となる．帯川らは，バイスと工作物の間を固体接触問題として定式化し解析を行っている [帯川 93]．固体接触問題の解析には，繰り返し計算が必要なうえ，表面でのすべりのモデル化や解析と実際の把持状態の対応づけといった実用上の問題点もある．限定された把持具に対しては，工作物との間の摩擦係数の実験的な評価についても報告されているものの [Xie 00]，一般的な問題に対する精度のよい接触状態解析は行われていない．

加工誤差のモデル化　加工誤差に関しては，従来から数多くの系統的な整理がなされている．エンドミル加工における誤差の分析としては，白瀬によるエンドミル加工誤差の要因分析と定量化 [白瀬 86] および加工誤差のばらつきに関する報告 [白瀬 89] が行われている．

様々な誤差の中で，比較的簡便に評価でき，広く使われているものとして，スクエアエンドミルの切削力による工具変位をモデル化したものが提案されている．このモデルは，形状モデルと連携して用いることにより加工条件の決定に利用されている [Tsai 91]．工具変位による誤差に関しては，切削力による工具変位を補正するハードウェアの開発も行われている [Yang 98]．

また，ボールエンドミルの切削力による加工誤差に関する研究も報告されている [Feng 96]．さらに，ボールエンドミル加工に対しては，近年，高送りによる高能率化が進むにつれ，表面粗さの生成機構に関する検討も行われている [内藤 93][是田 93]．

多くの研究が加工誤差として上述の工具変位のみを対象としているが，前項で示したように熱膨張や把持による変形についての研究も報告されてる．さらに，工作機械の熱変形に関する

研究についても有限要素法を基にした変形解析 [森脇 91] やニューラルネットワークを用いた変形予測 [森脇 92] など数多く行われている．また，切削による形状変化を考慮した薄肉構造物の加工時の誤差に関して，有限要素法による解析 [岩部 97] や自動メッシュ生成を含めた解析について報告がなされているが [Ratchev 00]，メッシュの再計算や計算時間などに問題を残している．

モデルパラーメータの決定　切削加工は複雑なプロセスであるので，ほとんどの研究では，事前の予備実験に基づく現象論的なモデルを用いて解析を行っている．加工シミュレーションの結果が妥当なものであるためには，モデルの信頼性が大きな問題となる．すなわち，いかに合理的かつ簡便にモデルの中に含まれるモデルパラメータの決定を行うかが重要な問題である．

エンドミル加工の切削力モデルのパラメータとしては，比切削抵抗を用いる方法が広く使われている．処理の流れは，まずエンドミルを微小な切れ刃に分割近似し，各微小領域での切削断面積を計算する．そして，各微小領域での切削力を比切削抵抗を用いて定式化する．全体としての切削力は，工具のすべての切れ刃に加わる微小切削力をベクトル的に加算することによって得られると仮定する．この方法では，どのような因子が比切削抵抗に影響をおよぼすかをモデル化することと，実際の比切削抵抗の求め方が重要である．比切削抵抗の求め方としては，(a) 予備実験によって比切削抵抗を決定する方法と，(b) エンドミル加工を行った加工結果から比切削抵抗を推定する方法がある．以下，これらについて述べる．

実際のエンドミル加工とは別に予備実験によって比切削力を決定する方法としては，次のような研究が発表されている．

- 微小切れ刃での切削を傾斜切削で近似してせん断角，摩擦角などを用いて比切削抵抗を定式化し，別に予備実験を行いこれらの諸量を求める方法．この方法では，予備実験に多大の労力が必要となる [Yang 91]．
- 2 次元切削の予備実験を行い，比切削力に関する実験式を構築する方法．この方法では計算のアルゴリズムも簡単で実験式の同定も比較的容易にできるという利点がある反面，実験の理論的背景が曖昧で精度・信頼性の面で問題が残る [蔡 91]．

ボールエンドミルを用いて行った加工の結果から，比切削力を推定する方法としては，次の研究がある．

- ある条件の加工結果から比切削力パラメータを決定し，他の条件の切削力を推定する方法である．しかし，実現されたシステムでは，加工結果からパラメータを推定するアルゴリズムに作業者の発見的な補正を必要とする部分があり問題が残る．また，回転軸に対して垂直な平面内の加工しか扱っていない [藤井 88]．

また，松村は，旋削加工を対象に，ニューラルネットワークを用いてモデルパラメータを学習しつつ予測を行う適応予測の概念を提案した [松村 92]．この研究は，プロセスモデルに関する既存の知識と実加工から得られる情報を融合しているという点で意義深い．しかしながら，エンドミル加工のような加工形状がプロセスに大きく影響する場合には，学習情報のインデックスとして工作物形状の情報を含めた事例情報を適切に取り扱うことにより，経験的データの適用対象を選択する機能が必要になると考えられる．

加工プロセスのモデル化の問題点 モデル化が行われているのは，再現性の比較的高い限られた現象に対してのみであり，工具の運動誤差，構成刃先，刃先丸みによる押しならし効果，むしれ，こばかけ，ばり，などといった現象に対する研究は少ない．さらに，これまでにモデル化されてきた現象も，独自の前提条件を導入しており，考慮している要素の範囲も研究ごとに異なる．そのうえ，加工熱による熱変形や工作物の弾性変形といった異なる物理相間での影響については全く検討されていない．また，いずれのモデルにおいても，パラメータ同定の問題は解析精度に直接影響する大きな問題である．

2.2.2 切削加工の作業設計に関する研究

ここでは，作業設計に関する研究のうち，工具経路生成，加工条件設定，把持方法の決定について示す．これらの決定項目は本来は相互の影響を考慮して決定されるべき要因であるが，把持方法の決定，工具経路生成，加工条件設定の順に逐次決定されることが多い．

把持方法の決定 工作物把持方法の決定は，運動学的に運動を拘束することを評価尺度とした研究が多い [Boerma 88] [Hirai 94]．これらの研究では，形状特徴や知識処理の手法を適用して把持方法の決定を行っている [Nee 90] [Sakurai 92]．一方，工作物の弾性変形を考慮して把持位置を決定する研究は有限要素法と最適化手法を併用したものが提案されている [Menassa 91][Chai 96] [Sela 97] [青山 96]．

また，把持に関するハードウエア開発も行われており，力制御のためのアクチュエータとセンサを内蔵した把持具 [Mannan 97] の開発も行われている．

これらの多くの研究では，把持の制約条件として加工時に発生する切削力が事前に規定されているものとして取り扱っている．しかしながら，切削力は工具経路および加工条件によって変動するものであり，これらの相互の影響を取り扱った研究例は少ない．

工具経路生成 近年の工具経路生成の研究は，多軸加工における工具経路生成が主な研究対象であるが，ここでは 3 軸加工での工具経路について示す．3 軸加工でのポケット加工に関する工具経路の生成方法については，ボロノイ法と呼ばれるポケット形状をスパイラル状に加工していく工具経路の生成アルゴリズムが 80 年代後半に確立した．また，コーナー部での切削力の増加を抑える加工法の提案や [岩部 89]，工具経路パターンの評価に対する研究が行われた [閻 98]．さらに，自由曲線で生成されるポケットに対する拡張についても報告されている [Jeong 99]．これらの研究は，幾何学的な計算により，指定された加工領域をある密度で充填する空間曲線を求める手法の構築を主眼としており，物理的な影響を考慮した工具経路生成はあまり行われていない．

また，金型などの曲面加工のための工具経路生成報としては，逆オフセット法などの提案があるが [近藤 88]，基本的にはオフセット面の生成と，オフセット面を充填する工具経路のパターンの設定という幾何学的な評価尺度で決定されることが多い．

加工条件の決定 加工条件の設定はデータベースに関する研究と最適化問題として取り扱う研究の二種類に分けられる．

データベースとしては，機械振興協会を中心に整備された豊富な事例データを有するデータベースが有名である [機械振興協会 02]．また，近年では，インターネットを介したデータベースの共有を指向した加工データベースの整備も行われている [関口 99]．これ以外にも，各工具メーカが推奨加工条件を提示している．このようなアプローチでは加工条件のインデックスをいかに作成するかが課題となる．事例ベース推論を適用した試みも報告されている [長野 01] が，工作物形状の影響の取り扱いなどに課題を残している．

加工条件を最適化問題として取り扱う試みは，古くからなされている．数理最適化手法を基にした決定の試みもなされてきた [岩田 70]．これらの研究では，多変数・多制約問題に対しての定式化と，様々な最適化手法の適用に関する多くの検討がなされてきた [Ermer 97]．

エンドミル加工においては，工作物の形状を積極的に考慮することが不可欠であり，前節で述べた加工シミュレーションと連携した形での加工条件設定が試みられてきた [Takata 89][Spence 94]．しかしながら，幾何形状を考慮したシミュレーションは計算時間がかかるため，多変数の条件設定には至っていない．さらに，工具経路は事前に決定済みとして固定的に取り扱うものが多い．

2.2.3　加工状態の認識・診断に関する研究

異常状態を信号処理によって行う研究は古くから数多く行われてきたが，特に機械加工の自動化が進んだ 80 年代以降積極的に研究されてきた．基本となる考え方は，加工中に何らかの信号を計測し，正常状態と異常状態に対応する特徴量を抽出すると言うものである．まず問題となるのは，どのような信号を計測するかである．とくに，エンドミルやドリル加工のような回転工具を用いた加工では，工具側にセンサを配置することは大掛かりな設備となるため [Wang 68][キスラー 94]，間接的に計測可能な情報として，切削音 [Takata 86]，回転速度のばらつき [Takata 87]，モータ電流 [Mannan 89]，切削力 [Mitsuishi 92]，などの信号について検討されてきた．また，工具破損に特有な情報として AE(Accostic Emission) を用いる方法も提案されてきた [Iwata 77]．

特徴抽出の手法としては，ARMA(Autoregressive Moving Average) モデルなどの時系列モデリング，実時間信号処理，周波数成分の監視，などが用いられてきた．また，状態判定については，エキスパートシステムやニューラルネットワークなどが用いられることが多い [Prickett 99]．特に，80 年代後半からはニューラルネットワーク技術の普及に伴い，複数のセンサ情報を融合することで信頼性をあげるセンサフュージョン研究が数多く行われた [Dornfeld 90]．また，加工シミュレーションの結果をもとに信号の正規化を行い，びびり診断 [Mitsuishi 92] や工具磨耗推定 [森脇 98] を行う研究も行われている．

このような間接計測以外の研究として，工具磨耗のインタープロセスオンマシン計測に関する研究 [松村 01] や，画像情報を基にした寿命予測 [Teshima 93] なども報告されている．

また，遠隔地への状態提示として画像情報とシミュレーション情報を転送する試みも行われている [Luo 02]．

2.2.4 加工研究の現状と課題

これまでの加工に関する研究に共通する課題としては，暗黙のうちに定型的な作業を前提としており，加工状況が変化する非定型的な作業における，適用について考慮されてこなかった点が挙げられる．すなわち，これまでに開発されてきたシミュレーション手法の多くが，個々の問題ごとに対象とする物理量に対して断片的かつ事例依存的な近似を行っていることから，開発されたシミュレータを実際の加工対象に対して使用するためには，適切な物理量の選択と膨大な予備実験を行う必要がある．このようなシミュレーションの構成に関する評価事項はこれまで研究者が暗黙のうちに行ってきたことであり，系統的にこれらの構成を行う手法の確立が望まれる．

また，作業設計においては工作物把持と工具経路生成を含む加工条件の設定がほぼ独立して計画されていることからも分かるように，加工条件設定の容易性や工作物把持の容易性などを踏まえた作業設計が行われていないことが問題である．これは，従来から作業設計に関しては，決定項目間の関係が固定的に取り扱われているうえ，相互の影響に対して検討されていない点に顕著に表れている．今後，製品の高密度化にともない薄肉・複雑形状の機械部品も必要となると考えられる．このような加工での加工の成否は，加工条件のみならず工作物の把持方法の決定にも大きく影響される．すなわち，今後，工作物把持と加工条件決定を整合的に行うための手法の確立が不可欠である．

最後に，状態認識に関しては，自動での判断に注力するあまり，どのような過程でその判断に至ったのかが分かりにくいという点が問題であると言える．加工状態の認識は本来，加工プロセスに対する深い理解をもとに行われるべきものであり，状況の解釈を人間に委ねるというのであれば，いかに多くの情報を系統的に作業者に提示するかというインタフェースの問題と，推定精度の高い状態推定手法の確立が大きな課題である．

また，これら 3 つの研究は，自動化できる部分からボトムアップ的に自動化を進めてきたため，必要とされる情報が整合しておらず，これらをそのまま連携させて問題解決に利用するのは困難であるという課題もある．

2.3 加工作業遂行における課題

第 2.1 節でまとめたように，今後の作業者には，新たな問題に直面した場合に，問題の捉え方を再構成しつつ新たな知識の獲得も行うような作業遂行が求められている．熟練作業に対する調査の結果，このような作業遂行の源泉として，実際の作業体験に基づく加工プロセスの深い理解と作業遂行における一貫した行為決定能力が必要であることが明らかになった．

しかしながら，既存の加工研究の多くは，事前に規定された固定的な問題の枠組みにおける分析や作業設計を行っている．このような固定的な枠組みで断片的に予測・生成された情報からどのように全体の作業遂行につなげていくのかは大きな問題であると言える．

また，作業者を取り巻く社会的環境変化としては，1) 標準的作業の減少による加工経験の量的不足と高度作業への要求の高まり，2) 作業者の安全への配慮の進展に伴う加工プロセスと作業者の隔離の徹底，といった変化が起きており，このような変化への対応も不可欠である．

参考文献

[小関 85] 小関 智弘，”鉄を削る”，太郎次郎社，(1985)

[ポラニー 80] M. ポラニー,”暗黙知の次元”, 紀伊国屋書店, (1980)

[ギブソン 85] J.J. ギブソン著；古崎敬 [ほか] 共訳，“生態学的視覚論：ヒトの知覚世界を探る”，サイエンス社 (1985)

[生田 87] 生田久美子，”「わざ」から知る”，東京大学出版会，(1987)

[上野 99] 上野直樹，”仕事の中での学習 状況論的アプローチ”，東京大学出版会，(1999)

[Schmidt 88] R. A. Schmidt，”Motor Control and Learning”, Human Kinetics, (1988)

[小野里 98] 小野里雅彦，”きさげ作業における技能の分析とそのモデル化”，計測と制御 特集 熟練技能の解明とその機械化，Vol.37, No.7,(1998)

[Imamizu 00] H. Imamizu, et. al, ”Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool”, Nature, Vol.403, 13 Jan. 2000 (2000)

[入来 00] 入来篤史，”ニホンザル道具使用の脳内機構ーシンボル操作の起源に挑むー”, 認知科学, Vol.7，pp.195-201(2000)

[Doya 99] K. Doya, ”What are the computations in the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex”, Neural Networks, Vol.12, No.7,(1999)

[川人 96] 川人光男，”脳の計算理論”, 産業図書，(1996)

[Gallese 98] Gallese V. , Goldman A., ”Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading”. Trends in Cognitive Sciences 2, 493-500

[佐伯 86] 佐伯 胖，”認知科学の方法”，東京大学出版会，(1986)

[職業能力開発大学校 96] 職業能力開発大学校研修センター 調査研究報告書 No.84，”FA 化された生産現場に存在する熟練技能の実態と新たに必要とされる熟練技能に関する実態調査報告”，(1996)

[職業能力開発大学校 95] 職業能力開発大学校指導科 指導科報告シリーズ No.13，”技能習熟における能力の構造化過程”，(1995)

[大浦 00] 大浦 容子，”創造的技能領域における熟達化の認知心理学的研究”，風間書房，(2000)

[NEDO 94] 新エネルギー・産業技術総合開発機構　平成 6 年度調査報告書 ”熟達マシンシステムの調査研究”，(1994)

[職業能力開発大学校 01] 職業能力開発大学校能力開発研究センター 調査研究報告書 No.984，”高度熟練技能と OJT を支援する Off-JT の可能性〜OJT による能力開発に関する研究 中間報告〜”，(2001)

[小松原 00] 小松原 明哲，”職人の技の認知行動モデルの作成”，人間工学，Vol.36，特別号，pp.532-533

[森 95] 森 和夫，”ハイテク時代の技能労働 生産技能の変化と教育訓練”，中央職業能力開発協会，(1995)

[大浦 96] 大浦 容子，”熟達化”，認知心理学 5 学習と発達，東京大学出版会，pp.11-35(1996)

[Dreyfus 87] ，H. L. Dreyfus and S. E. Dreyfus，”純粋人工知能批判 —コンピュータは思考を獲得できるか—”，アスキー出版局，(1987)

[日経デジタルエンジニアリング 02] ”IT 化がノウハウを失わせる”，日経デジタルエンジニアリング，No.51，pp.42-43(2002)

[森 93] 森 和夫，菊池 安行，”生産技能の類型化に関する調査 (1) —自動車製造業の技能労働と職業能力”，職業訓練研究，Vol.11，pp.1-17(1993)

[三好 01] 三好隆志，”金型スキルの技術化／コンピュータ化”，2001 年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料，pp.119-123

[井原 98] 井原 透，松村 隆，伊東 誼，”工程設計に関する技術者指向モデルの同定支援システム —作業設計の場合—”，精密工学会誌，Vol.64, No.1, pp.111-115(1998)

[藤田 02] 藤田 光伸，鎌田 実，宮田 圭介，”機械操作における認知能力の熟練技能解明とその応用に関する研究”，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.4, No.1, pp.67-77(2002)

[末長 98] 末長 修，”人間－機械系における能動操作器を用いた習熟訓練に関する一研究（第 2 報）”，人間工学，Vol.34, No.2, pp.67-77(1998)

[末長 00] 末長 修，”手動制御系における注意喚起による人間の学習特性への効果”，人間工学，Vol.36, No.1, pp.1-9(2000)

[溝口 97] 溝口 理一郎，池田　満，”オントロジ —工学序説ー内容指向研究の基盤技術と理論の確率を目指して —”，人工知能学会誌，vol.12, pp. 559-569(1997).

[Iwata 89] Iwata, K. and Fukuda, Y., ”KAPPS: Know-How and Knowledge Assisted Production Planning System in the Machine Shop”, Manufacturing Systems, Vol.18, No.2, pp.131-139(1989)

[浅田 90] 浅田 春比古，他，”熟練作業者の作業計測による制御判断則の獲得とロボットの作業教示”，日本ロボット学会誌，Vol.8, No.1, pp.17-24(1990)

[山根 95] 山根八洲男，”熟練作業のメカトロニクスシステムによる自動化”，精密工学会誌，Vol.61, No.7, pp.923-926(1995)

[森口 96] 森口 一豊，近藤 司，五十嵐 悟，斎藤 勝政，佐々木 哲夫，”金型磨き作業の自動化に関する研究”，砥粒加工学会誌，Vol.40, No.6, pp.312-315(1996)

[山田 02] 山田 陽滋，鴻巣 仁司，森園 哲也，梅谷 陽二，”自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案 ”，日本機械学会論文集，Vol.68, No.666，pp.509-516(2002)

[Vicente 90] Vicente, K. and Rasmussen, J. , The ecology of human machine systems ll: Mediating ”direct perception” in complex work domain. Ecological Psychology, Vol.2, No.3, pp. 207-249(1990)

[Sheridan 92] T.B. Sheridan, ”Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control”,The MIT Press, (1992)

[Azuma 97] Azuma, R. T., ”A Survey of Augmented Reality”, Teleoperators and Virtual Environment, Vol. 6, No. 4, pp.335-385(1997)

[飯島 93] 飯島 淳一，”意思決定支援システムとエキスパートシステム”，日科技連，(1993)

[Kidd 92] Kidd, P. T., On the Design of Skill Supporting Computer-aided Technologies, IFAC Automated Systems Based on Human Skill ,pp.35-41(1992)

[支援基礎論研究会 00] 支援基礎論研究会編，” 支援学 管理社会をこえて ”，東方出版，(2000)

[石田 96] 石田 亨, 片桐 恭弘, 桑原 和宏，” 分散人工知能 ” , コロナ社,(1996)

[ウィノグラード 86] T. ウィノグラード/F. フローレス，” コンピュータと認知を理解する—人工知能の限界と新しい設計理念 ” 産業図書，(1986)

[Kirlik 99] A. Kirlik, ”Ecological Modeling of Human-Machine Interaction”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.1, pp. 732-737 (1999)

[石塚 01] 石塚 基, 堀口 由貴男 , 椹木 哲夫, ”エコロジカルアプローチによる自動化機器と熟練者のインタラクション解析”, 第 45 回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集, (2001)

[Yamazaki 97] K. Yamazaki, Y. Hanaki, M. Mori, K. Tezuka, ”Autonomously Proficient CNC Controller for High-Performance Machine Tools Based on an Open Architecture Concept”, Annals of the CIRP, Vol.46, No.1, pp.275-278(1997)

[成田 02] 成田 浩久，” 工作機械の自律化・知能化を目的としたヴァーチャルマシニングシミュレータの開発 ”，大阪大学博士論文，(2001)

[Wang 86] Wang,W.,Wang,K., ”Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids”, IEEE CG&A, Dec., Vol.8 (1986)

[Takata 89] Takata, S., Tsai, M.D., Inui, M. and Sata, T., A cutting simulation system for Machinability evaluation using a workpiece model, Annals of the CIRP, 38/1, pp.417-420(1989)

[山崎 92] 山崎 好幸，“モデルベースド・インテリジェント加工ステーション”，大阪大学修士論文，(1992)

[El-Mounayri 97] H. El-Mounayri, M. A. Elbestawi, A. D. Spence and S. Bedi, ”General Geometric Modelling Apporach for Machining Process Simulation”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.13,pp.237-247(1997)

[藤尾 00] 藤尾三紀夫，柳下福蔵，鈴木　裕，”Boundary - Map データ構造に基づく CAD/CAM システムの開発 ”，精密工学会誌，Vol.66, No.7，pp.1048-1053(2000)

[乾 99] 乾 正知，垣尾良輔，” NC 加工結果の高速な可視化手法—3 次元グラフィックス表示装置の利用— ”，精密工学会誌，Vol.65, No.10, pp.1466-1470(1999)

[Kline 82] Kline, W.A., DeVor, R.E. and Lindberg, J.R., The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application of Cornering Cuts, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.22, No. 1,pp.7-22(1982)

[Smith 91] S. Smith, J. Tlusty, ”An Overview of Modelling and Simulation of the Milling Process”, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, May , pp. 169-175(1991)

[Armarego 89] E.J.A. Armarego (1), N.P. Deshpande, ”Computerized predictive cutting models for forces in end-milling including eccentricity effects” Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, pp.45(1989)

[Fuh 97] Kuang-Hua Fuh, Ren-Ming Hwang, ”A Predicted Milling Force Model for High-Speed End Milling Operation”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.37, No.7, pp.969-979(1997)

[成田 00] 成田浩久，白瀬敬一，若松栄史，荒井栄司；ヴァーチャルマシニングシミュレータを用いた NC プログラムの評価と修正，日本機械学会論文集 (C)，66 巻, 648 号, (2000-8), pp.2871-2876.

[Ong 02] S. K. Ong, L. Jiang and A. Y. C. Nee, ”An Internet-Based Virtual CNC Milling System”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.20,pp.20-30(2002)

[藤井 88] 藤井 義也，寺井 丈浩，” ボールエンドミルシミュレータに関する研究 —切削抵抗解析— ”，精密工学会誌，Vol.54, No.12, pp.2301-2306(1988)

[Yang 91] Yang, M. and Park, H., 1991, ”The Prediction of Cutting Force inBall-End Milling”, International Journal of Machine Tool Design andResearch, Vol. 31, No.1, pp. 45-54(1991)

[Tai 94] Ching-Chih Tai, Kuang-Hua Fuh, ”A Predictive Force Model in Ball-end Milling Including Eccentricity Effects”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.34, No.7, pp.959-979(1994)

[Sim 93] Choonggun Sim, Minyang Yang, ”The Prediction of the Cutting Force in Ball-end Milling with a Flexible Cutter”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.33, No.2, pp.267-284(1993)

[蔡 91] 蔡 明達，“切削プロセスモデルに基づく加工シミュレーションとＮＣプログラミング”，東京大学博士論文，(1991)

[Saito 91] Saito, T., and Takahashi, T., “NC Machining with G-buffer Method”, Comp.Graph., 25, 4 July, 207 (1991)

[木村 87] 木村 文彦，“形状モデリングと CAD/CAM”，精密工学会誌， 53， 3， 361 (1987)

[Jerard 89] Jerard, R., et al, ”Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces”, IEEE CG&A, Jan., 26 (1989)

[Lolenson 87] Lolenson, E., W. and Cline, E., H., “Marching Cubes:A High Resolution 3D Surface Construction Algolithm”, SIGGRAPH’87, vol.21, No.4, 163 (1987)

[岸浪 89] 岸浪 健史，金井 理，新庄 博之，中原 博史，斎藤 勝政 “Voxel 表現法の機械加工シミュレータへの応用”，精密工学会誌， 55， 1，105 (1989)

[呂 90] 呂 恒正，三好 隆志，斎藤 勝政，“P-map 形状モデリング方式による CAD/CAM システムに関する研究—P-map の概念及び特性—”，精密工学会誌， 56， 8， 1411 (1990)

[臼井 90] 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 ，(1990)

[藤井 88] 藤井 義也，寺井 丈浩，“ボールエンドミルシミュレータに関する研究—切削抵抗解析—”，精密工学会誌， 54， 12， 2301 (1988)

[帯川 92] 帯川 利之，海老原 克司，松村 隆，白樫 高洋，“MC によるエンドミル加工の精度予測”,1992 年度精密工学会春季大会予稿集，(1992)

[Moriwaki 95] Moriwaki, T., Emwardy and Wang, Lihui, 1995, ”Study on Machining Error Due to Cutting Heat in Endmillimg”, Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University. pp. 131-140.

[松村 97] 松村 隆，高橋 重人，臼井 英治，“エンドミル加工における工具－被削材温度分布の数値解析”,1997 年度精密工学会秋季大会予稿集，pp.78(1997)

[Tsai 91] Tsai, M. D. and Takata, S., 1991, ”Operation Planning Based on Cutting Process Models, Annals of the CIRP”, 40/1, pp.95-98(1991)

[Weck 94] M. Weck, Y. Altintas, C. Beer, ”CAD Assisted Catter-Free NC Tool Path Generation in Milling”, Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.34, No.6, pp.879-891(1994)

[Altintas 92] Y. Altintas, D. Montgomery, and E. Budak. ”Dynamic peripheral milling of flexible structures”. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114(2), pp.137-145(1992)

[Abrari 98] F. Abrari, M. A. Elbestawi, A. D. Spence, ”On the Dynamics of Ball End Miling : Modeling of Cutting Force And Stability Analysis”, Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.38, No.3, pp.215-237(1998)

[Asada 85] Asada, H., and By, A.B., “ Kinematic Analysis of Workpart Fixturing for Flexible Assembly with Automatically Reconfigurable Fixtures ” , IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 2, pp. 1-9, 1985.

[Lee 87] Lee, J. D. and Haynes, L. S., ”Finite-Element Analysis of Flexible Fixturing System,” ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, No. 2, pp. 134-139(1987)

[帯川 93] 帯川，他，“マシニングセンタの加工精度予測と精度補償システム”，1993 年度精密工学会秋季大会予稿集，(1993)

[Xie 00] W. Xie, E. C. De Meter, M. W. Trethewey, ”An experimental evaluation of coefficients of static friction of common workpiece-fixture element pairs”, Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.40, pp.467-488(2000)

[白瀬 86] 白瀬敬一，稲村豊四郎，安井武司；エンドミル加工における加工誤差の要因分析 と定量化，精密工学会誌，52 巻, 4 号, (1986), pp.705-712.

[白瀬 89] 白瀬敬一，稲村豊四郎，安井武司；エンドミル加工における加工誤差のばらつき ，精密工学会誌，55 巻, 2 号, (1989), pp.323-328.

[Yang 98] M. Y. Yang, J. G. Choi, ”A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.120, May, pp.222-229(1998)

[Feng 96] Hsi-Yung Feng, Chia-Hsiang Menq, ”A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.118, NOVEMBER, pp.461-469(1996)

[内藤 93] 内藤 邦雄，大庫 和孝，小長 哲郎，阿部 忠之，神田 敬一，松岡 和彦，” 金型の高品位・高能率仕上げ切削法の開発 ”，精密工学会誌，Vol.59, No.4, pp.639-654(1993)

[是田 93] 是田 規之，江川 庸夫，黒田 基文，渡部 健，井伊 良治，”ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析”，精密工学会誌，Vol.59, No.9, pp.1537-1542(1993)

[森脇 91] 森脇 俊道，趙 成和，西内 元信，”環境温度変化によるマシニングセンタの熱変形”，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.57, No.539, pp.281-286(1991)

[森脇 92] 森脇 俊道，趙 成和，”ニューラルネットワークによるマシニングセンタの熱変形予測”，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.58, No.550, pp.246-251(1992)

[岩部 97] 岩部洋育，島田智晴，横山和宏，”エンドミルによる薄壁形状部品の加工精度に関する研究（切削力による工作物および工具の変形解析と加工精度）”，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.63, No.605，pp.239-246(1997)

[Ratchev 00] S. Ratchev, E. Govender and S. Nikov, ”Analysis and Prediction of the Accuracy of Machining of Thin Wall Components”, Proceedings of the 33rd International Seminar on Manufacturing Systems, pp.220-225

[松村 92] 松村 隆，帯川 利之，白樫 高洋，臼井 英治，“切削加工の適応予測”, 精密機械学会誌, 58, 12, pp.2044-2050(1992)

[Boerma 88] Boerma, J.R. and Kals, H. J. J., ”FIXES, A system for automatic selection of set-ups and design of fixtures”, Annals of the CIRP,Vol. 37. , No.1, 443-446(1988)

[Nee 90] Nee, A.Y.C. and Senthil Kumar, A., ”A Framework for an Object/Rule-Based automated Fixture Design System”, Annals of CIRP, Vol.40, No.1, pp.147-151(1990)

[Sakurai 92] Sakurai, H., ”Automatic Set-Up Planning and Fixture Design for Machining”, J. Manuf. Syst., Vol. 11, No.1, pp.30-37(1992)

[Hirai 94] Hirai, S., Hisa, T. and Iwata, K., ”A Model-Based Generation of Fixture Layout Candidates for Workpiece Holding”, 5th Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp.595-602(1994)

[Menassa 91] Menassa, R. J. and DeVries, ”Optimization Methods Applied to Selecting Support Positions in Fixture Design”, J. of Eng. for Industry, Vol. 113, Nov. pp.412-418(1991)

[Chai 96] Chai, W. ,Hu, S. J., and Yuan, J. X., ”Deformable Sheet Metal Fixturing : Principles, Algorithms, and Simulations”, J. of Manufact. Science and Engineering, Vol. 118, Aug. pp.318-324(1996)

[Sela 97] M. N. Sela, O. Gaudry, E. Dombre, B. Benhabib, ”A Reconfigurable Modular Fixturing System for Thin-Walled Flexible Objects”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.13,pp.611-617(1997)

[青山 96] 石川 悦郎，青山 藤詞郎，”ジェネティックアルゴリズムを用いた工作物締付条件の最適化”，日本機械学会論文集（C 編），Vol.62, No.598, pp.2409-2416(1996)

[Mannan 97] M. A. Mannan, J. P. Sollie, ”A Force-Controlled Clamping Element for Interlligent Fixturing”, Annals of the CIRP, Vol.46, No.1, pp.265-268(1997)

[Jeong 99] J. Jeong , K. Kim, ”Generating Tool Paths for Free-Form Pocket Machining Using Z-Buffer-Based Voronoi Diagrams”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.15,pp.182-187(1999)

[岩部 89] 岩部 洋育，藤井 義也，斎藤 勝政，岸浪 建史，”エンドミルによるコーナ部加工に関する研究 —コーナ部における切削機構の解析と新しい加工法”，精密工学会誌，Vol.55, No.5, pp.841-846(1989)

[閻 98] 閻 喜仁，白瀬 敬一，河端 裕，平尾 政利，安井 武司，”マシニングセンタの生産性向上に関する研究（第 2 報）—工具経路が生産性に及ぼす影響—”，精密工学会誌，Vol.64, No.5, pp768-772(1998)

[近藤 88] 近藤 司，岸浪 建史，斎藤 勝政，”逆オフセット法を基にした形状加工処理”，精密工学会誌，Vol.54，No.5, pp.971-976

[機械振興協会 02] 機械振興協会 技術研究所，”加工技術データファイル”,（財）機械振興協会技術研究所, (2002)

[関口 99] 関口 博，大谷 成子，”インターネットを利用した加工技術データベース”，M & E, 1999 年 8 月号，pp.128-134(1999)

[長野 01] 長野 竜也，白瀬敬一，若松栄文，荒井栄司，”事例ベース推論に基づく切削条件推論システム”，精密工学会誌，Vol.67, No.9, pp1485-1489(2001)

[岩田 70] 岩田 一明，”最適切削加工条件の設定に関する研究”，精密機械，Vol.36, No.2, pp.121-128(1970)

[Ermer 97] D. S. Ermer, ”A Century of Optimizing Machining Operation”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.119, NOVEMBER, pp.817-822(1997)

[Spence 94] A. D. Spence, Y. Altintas, ”A Solid Modeller Based Milling Process Simulation and Planning System”, Journal of Engineering for Industry, Vol.1994, FEBRUARY, pp.61-69(1994)

[Wang 68] K. K. Wang, S. M. Wu, and K. Iwata, ”Temperature Responses and Experimental Errors for Multitooth Milling Cutters”, Trans. of the ASME, Ser. B, 90-2, pp.353-359(1968).

[キスラー 94] 日本キスラー株式会社，回転式切削動力計カタログ，(1994)

[Takata 86] S. Takata, J.H. Ahn, M. Miki, Y. Miyao, T. Sata, ”A sound monitoring system for fault detection of machine and machining states”, Annals of the CIRP, Vol.35, No.1, pp.289-292(1986)

[Takata 87] S. Takata, T. Nakajima, J.H. Ahn, T. Sata, ”Tool beakage monitoring by means of fluctuations in spindle rotational speed”, Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, pp.49-52(1987)

[Mannan 89] M. A. Mannan, S. Broms / B. Lindstrom , ”Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements”, Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, pp.347(1989)

[Mitsuishi 92] Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y. and Warisawa, S.,1992, ”Real-Time Machining State Detection Using Multiaxis Force Sensing”, Annals of the CIRP, 41/1, pp.505-508(1992)

[Iwata 77] K. Iwata (2), T. Moriwaki / N. Takenaka, ”An application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear”, Annals of the CIRP, Vol.26, No.1, pp.21-24(1977)

[Prickett 99] P.W. Prickett, C. Johns, ”An Overview of Approaches to End Milling Tool Monitoring”, Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.39, pp.105-122(1999)

[Dornfeld 90] .A. Dornfeld / M.F. De Vries, ”Neural network sensor fusion for tool condition monitoring”, Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp.101-104(1990)

[森脇 98] 森脇 俊道，社本 英二，樋野 励，赤澤 浩一，” 切削力モデルに基づくエンドミル工具の磨耗量推定に関する研究（第 2 報）—データベースを必要としない手法の検討— ”，1998 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,pp.99(1998)

[松村 01] 松村　隆，” インタープロセス摩耗監視の自律的運用　—エンドミル加工の摩耗監視— ”，砥粒加工学会誌，Vol.45, No.4, pp.158-162(2001)

[Teshima 93] T. Teshima, T. Shibasaka, M. Takuma, A. Yamamoto / K. Iwata, ”Estimation of cutting tool life by processing tool image data with neural network ”, Annals of the CIRP, Vol.42, No.1, pp.59-62(1993)

[Luo 02] Y.B. Luo, S.K. Ong, D.F. Chen and A.Y.C. Nee, An Internet-Enabled Image- and Model-Based Virtual Machining System . International Journal of Production Research, Vol. 40, No. 10, pp.2269 – 2288(2002)

第3章　作業遂行支援の枠組み

本章では，まず，前章で指摘した切削加工の作業遂行支援における課題について詳細な分析を行う．続いて，人間を含む系での作業遂行に関する既存研究から得られる知見を分析・評価することにより，支援すべき内容の抽出を行う．そして，抽出された支援内容について，解決のための手法の検討を行なった後，本研究で提案する作業遂行支援の枠組みを提案する．

3.1　基本的な考え方

前章での分析の結果，これからの生産においては，深い作業理解に基づいて一貫した作業遂行を行うことが求められていることが分かった．以下では，このような作業遂行を実現する上で，現在どのような問題が生じているのかを明確化する．ここでは，工作機械による機械加工作業に限定して，現在の作業遂行の状態および問題点について，加工ワークステーションの変遷をたどりながら整理する．

3.1.1　作業遂行における現在の課題

課題抽出にあたり，まず，機械加工における作業者の作業遂行状態を記述する手法を導入する．この際，作業遂行における作業者の記述は，前章でも考察したように，情報処理アプローチを基本的な立場とする．

記述にあたって，本研究では現場ヒアリングならびに第2章の調査を基にして，作業者の内的状態および外在化された作業状態の両面から表現することを考える．すなわち，作業者の内的状態を，意図の生成 (Intention)，状況の予想 (Envision)，行動 (Motion)，知覚 (Perception)，習熟 (Expertise) の5つの機能単位をもとに表現する．また，内的状態に対応する外在化された作業状態は，計画 (Planning)，予測 (Prediction)，操作 (Operation)，観察 (Observation)，学習 (Learning) の機能単位をもとに表現することとする．

いま，高度な作業遂行を実現しようとすると，意図の生成，行動，知覚の3つの機能が現象 (Phenomena) を介して密に関連し合っていることが不可欠である．また，適応的作業遂行を行う場合には，状況の予測および習熟といった機能単位が有機的に結合されている状態が不可欠であると考える．そこで，適切な作業遂行は上記の機能単位が適切に結合された時に実現されるものと仮定する．なお，結合時の情報の流れは，能動知覚のように通常行なわれる行為の結果の観測としての知覚とは逆の情報の流れも存在することを考慮して，双方向を念頭に入れ，関係性を表示するにとどめることにする．

上述の記述法を用いて，熟練作業者による汎用工作機械での作業遂行を整理すると図3.1のようになる．

この作業遂行状態の特徴を列挙すると，以下のようになる．

- 事前準備から実際の作業遂行，さらに加工中の適応行動に至るまで個人で完結して行っている．これは，図3.1との対応でみると，意図の生成 (Intention) において，事前準備・

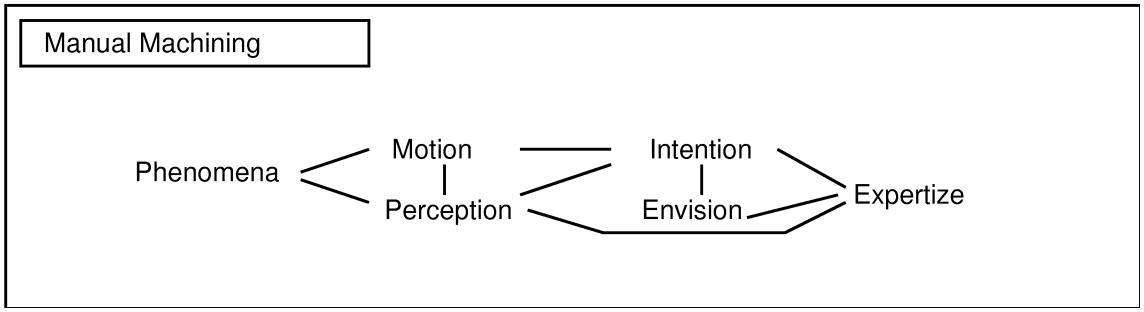


図 3.1 汎用工作機械を用いた作業遂行

作業遂行・適応行動が一貫して管理されていることを意味している．

- 加工機械と環境を共有していた上，作業プロセスから豊かな情報を受け取っている．これは，行動 (Motion)・知覚 (Perception)・現象 (Phenomena) が相互に密な関連を有しており，同時に，多くの情報が知覚されていることを意味する．
- 直接的な操作と観察のループを技能習熟に十分な作業回数繰り返すことで，加工機械や切削プロセスを深く理解している．これは，意図の生成・運動・現象・知覚の 4 者の関連が十分に成立するだけの作業を経験することにより，状況の予測 (Envision)・知覚・意図の生成の諸機能が習熟 (Expertise) することを意味している．

このような作業遂行の形態は，作業遂行能力の習熟という側面では，直接知覚が可能であるという点と，対象に対するある種の能動的知覚（行為の中での知覚）が可能であったという点で極めて豊かな環境であったと言える．これまでにも作業状態のフィードバックにより作業習熟や作業能率が改善されるという報告はなされている [加藤 95]．さらに，実際の加工作業という直接的な行為の中での知覚は，高い緊張感の下での知覚であり，能動的モニタリングによる熟達の促進 [大浦 96] という効果も有していると言える．このような環境での習熟の結果として，加工プロセスに対する深い理解に基づく適応的な作業遂行が可能となり，柔軟性を損なうことなく作業プロセス全体としての高度なパフォーマンスを実現していたと考えられる．

図 3.1 の状態は，加工における作業遂行において基本となる状態であると考えられる．そして，このような作業遂行形態は，多様なレベルで様々な変化が考えられる．すなわち，各機能単位ごとに，外在化による代替・分割が行われたり，新たな道具の導入による機能拡張などが行われると，作業遂行の形態は大きく変化することになる．さらに，各機能単位ごとでの変化に加えて，それらの組み合わせによっても新しい作業遂行の形態が生じることになる．

ここでは，現在最も普及している NC 工作機械を用いた作業遂行を例に変化について議論する．工作機械の NC 化により機械操作が自動化され，作業者は機械と環境をともにする必要が無くなった．これは，一人の作業員で複数台の機械を制御できることを意味し，生産の能率化およびコストダウンに貢献した．これを前述の記述手法を用いて表すと，図 3.2 に示すように，意図の生成と運動という機能連鎖の一部が外在化され，計画 (Planning) と操作 (Operation) という機能が導入されることとして表される．従来，個人で完結していた行為は暗黙的に決定されていた部分もあり，すべてを明示的に指示することは，新たな作業形態への変換が行なわれ

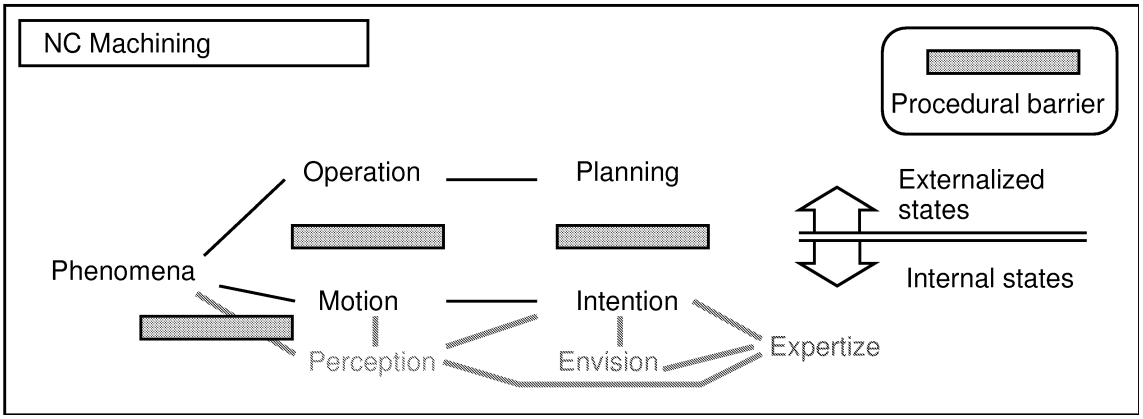


図 3.2 NC 工作機械を用いた作業遂行

たことを意味する．さらに，単に行為を明示化するだけではなく，事前に固定的に機械の運動を決定することは，作業環境を共有しないことを意味し，作業の進行に伴って適宜適応的に作業を遂行することができないことになる．そこで，事前に状況を予測することと，予測に基づいて安全かつ適応の不要な条件設定を行うという新たな作業要求が発生したことになる．さらに，作業遂行における外在化された計画と行動の間での整合性の減少という問題も発生することになる．すなわち，NC 工作機械の導入は単に作業の形態が変わっただけではなく，作業の要求内容の変更とそれに伴う新たな問題の発生を引き起こしたと言える．

また，機械操作を行う作業者は，自動加工中に次の加工のための工作物取り付けやプログラムの作成を行うことになり，加工プロセスを観察する機会は減少する．そして，汎用工作機械のように自らの行為に対する反応として加工状態の変化を直接的に知覚する作業形態ではなくなるので，加工プロセスを深く理解することは難しくなる．

さらに，加工に関係する全ての指令を NC 化することは経済的な範囲では実現できないので，事前準備などの手動作業は依然として残ることになる．結果として，作業において異なる指令形態が混在することになる．これらの指令形態の間で直接整合性を評価することはできないので，加工現象を通じてその妥当性を評価する必要がある．通常は，それぞれの決定の間で影響が出ないように事前に配慮して個別に計画を実施するが，これは作業の能率および精度の低下の原因となる場合がある．

以上まとめると，NC 工作機械の導入による変化として以下の点が挙げられる．

- 行動の意図を明示化したうえで，事前にトラブルを回避する新たな技能が必要となった．これは，図 3.2 において，計画から操作を経て現象へ至る作業遂行の流れが一方向であることを意味し，状況に応じた適応的な処理を行う必要の無い安全な計画を立案する必要が生じたことを意味する．

- 作業の直接的評価が得られにくくなった．すなわち，行動と知覚が現象と密な関連を有していた場合には，行動の評価が容易に得られたのに対し，操作の評価を獲得する仕組みは NC の枠組みでは提供されていないため，改善の余地があるかどうかについての評価が困難になった．

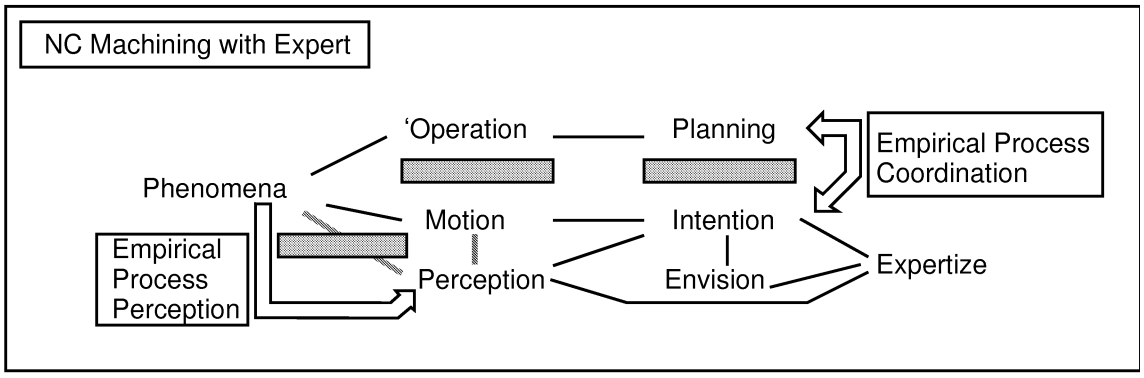


図 3.3 熟練作業者による NC 工作機械の利用

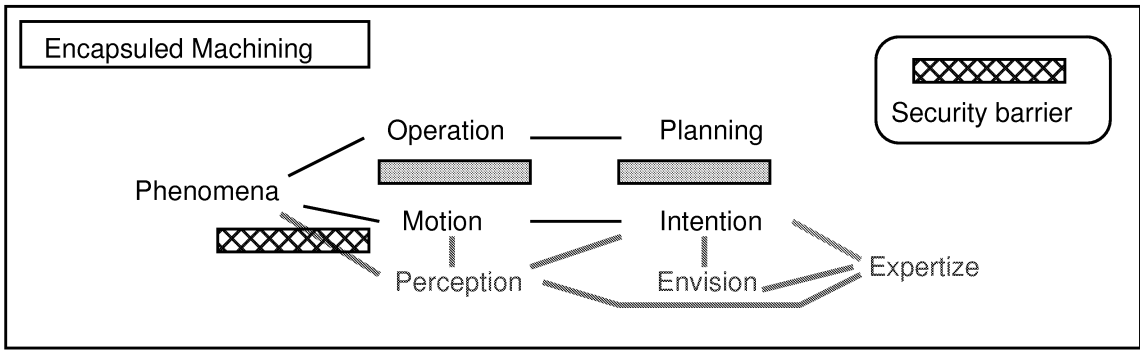


図 3.4 隔離された作業遂行

- 作業指令が分割化され，全体としての高度な作業計画を立案することが難しくなった．これは，機械操作において意図の生成と外在化された計画の間で整合性を維持するのが困難になったことを意味する．

このような NC 工作機械の使用に対して，現在，加工作業が遂行できているのは，図 3.3 に示すように，熟練作業者による経験的な作業理解に基づく調整が行なわれていることによると考えられる．即ち，十分に加工プロセスを理解している熟練作業者は，作業指令に対する評価が不十分な場合でも，経験的な評価を補うことにより分割された行為間の整合性の調整を行っていると考えられる．また，すでに加工プロセスを経験的に理解しているので，作業条件を決定・確認する段階での少数の加工情報からでも，適切な作業評価が実現できることを意味する．このように，すでに加工プロセスに対して十分な理解をしている作業者は，NC 工作機械を用いても良好に作業遂行可能であるものの，理解が不十分な作業者には，作業遂行に関して問題が生じる可能性がある．

そして，このような環境での技能習熟は従来に比べて困難であることから，今後，熟練技能者の後継者をいかに育成していくかは大きな問題になると考えられる．

また，前章で指摘した，現在進行しつつある作業者を取り巻く作業者の安全に関する環境変化は，図 3.4 に示すように，加工プロセスと作業者の隔離として作用する．この結果として，作業者の知覚を阻害し，作業者の習熟も困難になると考えられる．このような作業遂行状態では，作業者の習熟が期待できないのみならず，作業そのものの信頼性も低下することとなる．

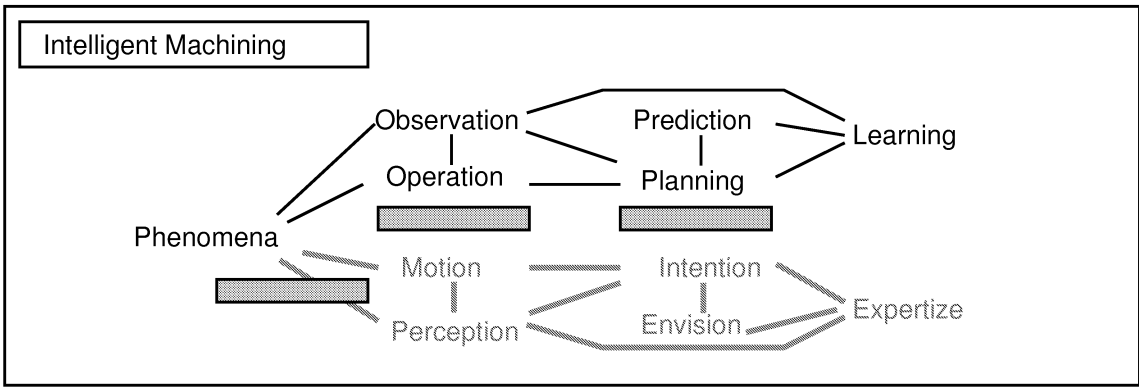


図 3.5 知能化工作機械による作業遂行

以上のような議論の観点から，1980 年代後半以降行なわれてきた工作機械の知能化研究を評価すると，図 3.5 のようになる．即ち，工作機械の知能化とは，人間と同等の処理メカニズムを人工的に実現し，工作機械が自律して加工を行うことを目指した研究であると言える．外乱に対する適応に関する研究としては，センサフィードバックの利用 [畑村 89] や学習制御の利用 [Ibaraki 02] などについて報告されている．また，加工プロセスシミュレーションを用いたモデルベースの作業設計も研究された [Tsai 91]．これは，加工中に発生する物理現象を事前に予測することにより，必要な対策を予防的に施すことを目指した研究である．そして，知能化工作機械研究においては，一般に作業者の役割は想定されていない．

工作機械の知能化研究は，注目する現象や加工対象をある程度限定した場合には良好な結果を示すものの，作業評価尺度の変更や，支配的な物理現象の遷移といった状況の変化への対応は困難である．さらに，事前準備や調整・保守などの直接的な作業との相互関係を考えると，機械が複雑な挙動をとることになるため，整合性を維持するのは，より困難になると考えられる．即ち，全ての作業が自動化されない限り，知能化工作機械を使用するための複雑な技能が新たに必要となると考えられる．

以上の分析より，現在の加工ステーションにおいては，対象の深い理解に基づく一貫した行為決定は熟練作業者の個人的能力に依存している部分が多いことが分かる．今後，熟練作業者の減少に対応するための課題としては，

- 加工事例の量的減少と隔離された加工プロセスからのプロセス知識の獲得手法の開発，
- 小ロット加工に代表される多様な状況変化の下で，部分問題化された断片的な作業設計を整合させながら作業を遂行する手法の開発，

の二つに集約することができる．

ここで，これらの課題を克服しようとする場合，自動化の更なる徹底や作業者教育の充実など，様々な実現形態が考えられる．本研究は，既存の NC 工作機械を中心とした構成からの変更をできるだけ抑えることが実用上適切であるとの立場をとる．即ち，現在の熟練作業者が行っている作業形態に準じた作業形態を実現・拡張することを目指す．これは，本研究が対象とする高度な作業柔軟性を有するためには，加工プロセスに対する深い理解を有する作業者の存在

は不可欠であると考えるからである．従って，これまでに指摘した，作業設計における不整合と加工プロセスに関する知識の欠如について作業者を支援することを本研究の課題とする．これは，現在の熟練作業者が技能を維持・発展させてきた，意図の生成－状況の予想－行動－知覚－習熟という個人の内的状態として完結していた作業遂行・習熟の構造を，自動機械による行動の代替，プロセスからの隔離，CAM に代表される外在化された情報システムとの共存，といった新たな作業環境においていて，作業者－工作機械システムにおける作業遂行・習熟の構造として再構築することを意味する．このような立場は，作業としては同一ではないものの，汎用工作機械を用いた加工技能の習熟が技能獲得研究の立場から評価しても合理的であることからも，妥当な設定であると考えられる．

3.1.2 支援機能の抽出

第 3.1.1 節で明確化された本研究の課題を，これまでの作業者支援に関する議論を参照しながら具体化すると，

- 作業者が少ない加工事例の部分的な経験から効率的に加工プロセスを認識するための仕組み，
- 作業者が適宜着目する視点を変更しながら外在化された作業計画と自己の行為を整合的に遂行する仕組み，

と整理できる．

ここで，前者の加工事例の量的減少を補うためには一般的知識を含めた事例情報の共有が不可欠であると考えられる．そして，隔離された加工プロセスからのプロセス知識の獲得には，可視化技術を中心とした状態提示が，作業支援として有効であると考えられる．また，後者の外在化された作業計画と自己の行為の整合を取るためには，工作物把持などの段取り段階から，作業設計，さらに実際の実行における監視にわたって一貫した支援機能が不可欠である．そして，支援システムの再構成についても考慮に入れることが必要であることが分かる．

以上，従来から実施された開発研究は，必要となる機能モジュールに対して，開発者が独自の枠組みを設定して完結したシステムの実現を目指していたことからみて，状況や文脈が明示されていないことに問題の本質があると言える．

作業遂行支援における課題を克服するための支援機能をまとめると，

A 具体的事例と一般的知識を融合させたシミュレーションとその利用支援，

B 加工状態提示による対象の感覚的理解の支援，

C 多面的・総合的な作業設計の支援，

D システムのカスタマイズ支援，

となる．

これら 4 つの必要機能の関係を整理すると，図 3.6 のようになる．

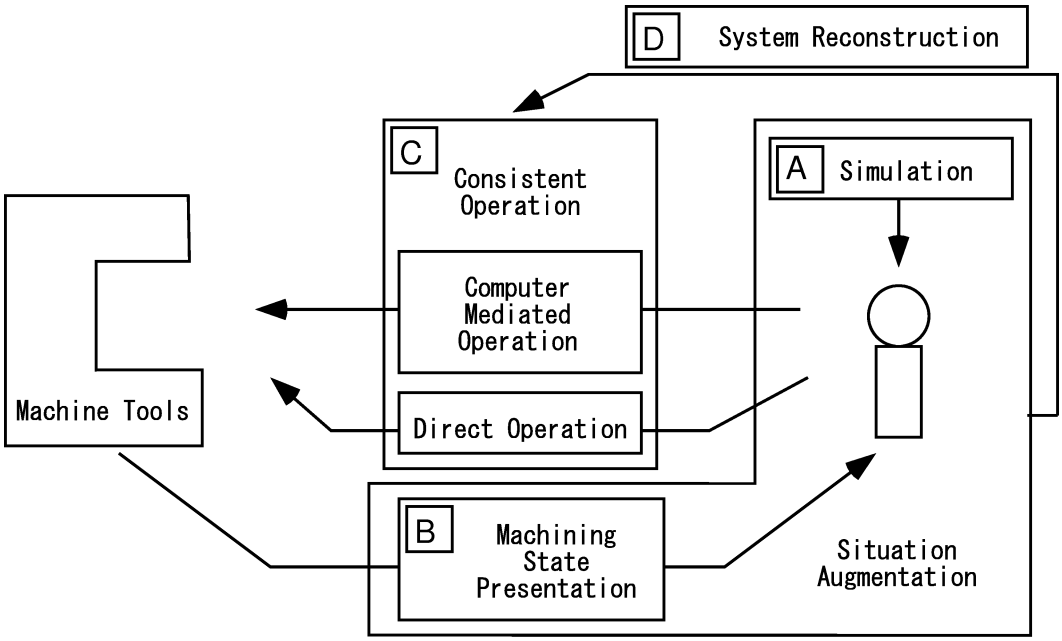


図 3.6 作業支援のための必要機能

3.2　抽出された支援機能の実現手法の提案

本節では，前節で抽出された支援機能を実現する手法について提案を行う．

まず，図 3.6 中 A のシミュレーションの利用にあたっては，モデルパラメータが高い信頼性を有していることと，多様な断片的予測結果が整合的に取り扱われることが必要である．これらの機能は，実加工情報からのモデル学習と断片的な予測を関連付ける対象表現の導入により実現が可能である．また，図 3.6 中 B の対象理解を助けるための状態提示に関しては，大域的かつ高精度な状態推定が不可欠である．さらに，現実の不確かさを反映するためには，計測を行うことは不可欠であるが，計測領域が局所的に限定されることも重要である．これらの手法を適用することにより，図 3.7 に示すように，個人の具体的な観察事例とシミュレーションに代表される一般的知識の融合がはかられ，作業に対する経験的モデル構築の支援が期待される．

図 3.6 の C に示す，整合的な作業設計を実現するためには，個別の作業設計間の競合の回避と，直接操作の情報空間へのモデル化支援が必要となる．後者は，現状の技術においては作業者による明示的な行為意図の外在化によらなければ実現できないと考えられる．さらに，図 3.6 の D に示す，システムのカスタマイズが行なわれるためには，構成されるシステムがモジュラリティの高いシステムであり，明確なインタラクションが定義されている必要がある．また，本研究で取り扱うような具体的作業にかかわるインタラクションにおいては，抽象化された記号レベルでの整合性の管理を行うよりも，現象レベルでの状態予測を介した相互作用の管理の方が有効であると考えられる．この支援の様子を図 3.8 に示す．

以上をまとめると，図 3.9 のようになる．このような支援により，作業者は，事前評価，計画の立案，加工中の状態認識について支援され，適応的作業遂行状態に近づくことが期待される．

3.3 作業遂行支援の枠組み

前節で述べた支援機能を実現するための枠組みとして，図 3.10 に示す基本構成を提案する．この実現には，作業者が意思決定を行う上で必要となる，加工状況認識・作業計画案の生成・作業状況と結果の予測などの機能について支援を行うための手法の開発が必要となる．これらの機能を支援することによって，作業者は，加工時に自らの感覚器から得られる情報に加えて，計測用センサから得られる多様な情報を関連付けながら現象の把握ができ，多面的で精緻な経験の蓄積を行うことができることとなる．さらに，意思決定にあたっては，自らの経験に加えて，加工シミュレーションによる加工状況の予測や過去の事例などを適宜参照しつつ作業全般にわたる一貫した作業遂行可能となり，様々な可能性を考慮した信頼性の高い意思決定が行なえるようになるものと考えられる．

この支援システムを実現するために必要となる要素技術としては，作業者との情報のやりとりを行うデバイス開発，加工状況予測のための加工シミュレーションの開発，密閉化された加工プロセスにおいて加工状況を推定する手法の開発，作業者の意思決定を補助する作業計画案の立案機能，加工事例の蓄積機能，システム再構成機能の実現などがある．さらにこれらの融合技術も大きな課題となる．個々の開発課題の概略をまとめると以下のようになる．

作業支援インタフェース 加工状況の可視化，決定支援情報の適切な提示，作業者からの容易な入力を実現するインタフェースの開発．

加工状態予測 多様な影響を考慮した合理的で信頼性の高い状況予測を行うことのできるシミュレーションシステムの開発．

加工状態推定 人間が直接知覚できない情報や加工状態について，現象の不確かさを反映して高精度に推定する機能の実現．

整合的作業設計 多様な評価基準や問題解決知識を基にした断片的な決定間での整合性を維持し，一貫した作業設計を行う機能の実現．

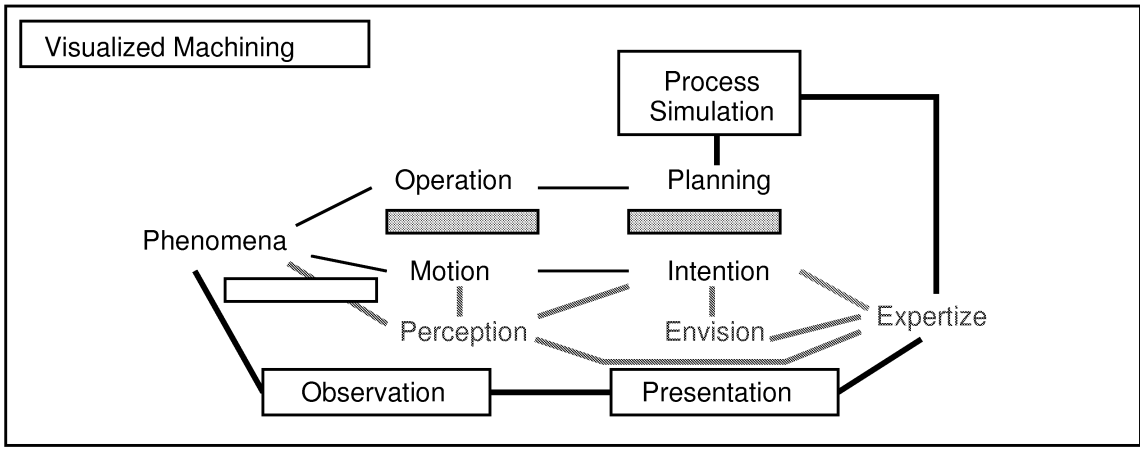


図 3.7 加工状態提示による習熟の支援

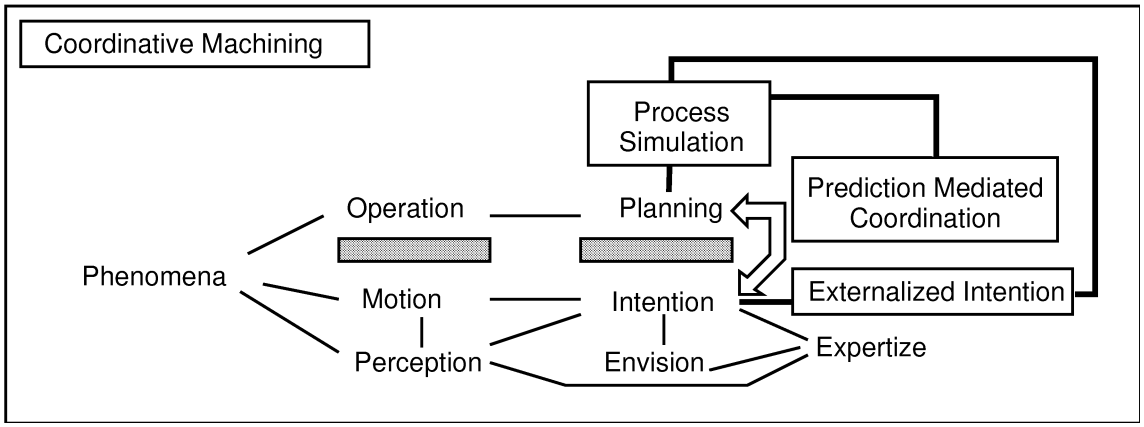


図 3.8 状況予測を介した協調的作業遂行

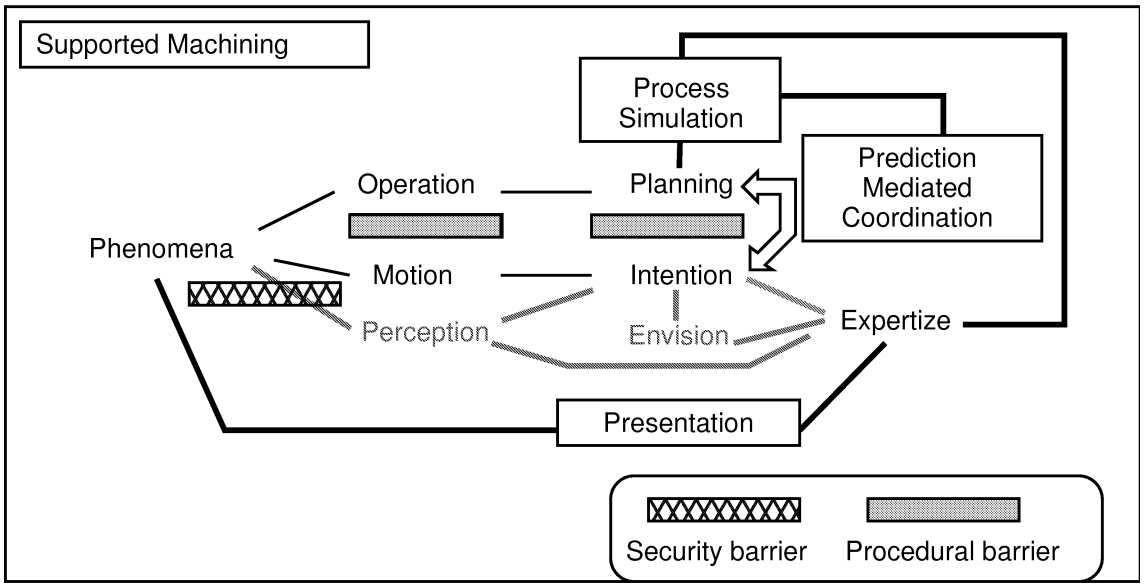


図 3.9 支援された作業遂行

加工事例蓄積 加工事例に関する情報を総合的に蓄積し利用する機能の実現.

システム再構成 状況の変化や作業者自身の変化に応じてシステムを再構成できる機能の実現.

これらの技術のなかで，インタフェースの実装に関しては仮想現実感技術や拡張現実感技術といった手法が提案されており，基盤となる研究がこれまでにもなされている．また，加工事例の蓄積と利用に関しては，ネットワーク環境でのデータベースや事例の共有に対する検討も始まっている．一方で，シミュレーションに関しては従来から加工シミュレーションに関する断片的研究が数多く行なわれているものの，状態予測の信頼性に関する議論は少ない．そして，加工状態の高精度な推定，一貫した整合的作業設計，システム再構成に関しては十分な成果は得られていない.

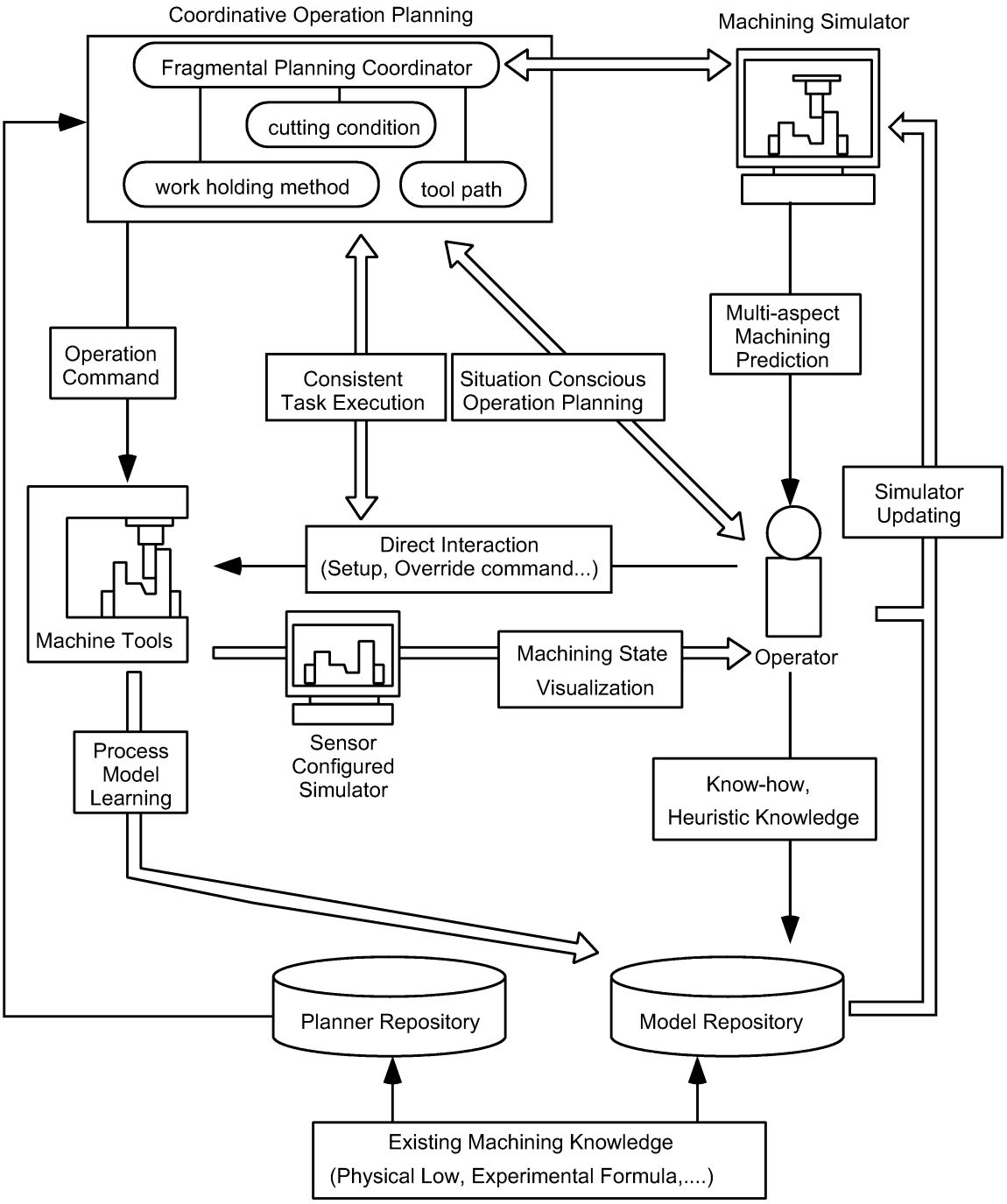


図 3.10 作業遂行支援の構成

そこで，本研究においては，加工状態の信頼性の高いシミュレーション，現象の不確かさを反映した加工状態推定，再構成可能な整合的作業設計の 3 つのテーマに関して新たな手法を提案し評価を行なった．以下の第 4 章から第 6 章においてはそれぞれの課題に対する具体的検討結果について示す.

参考文献

[加藤 95] 加藤 秀雄，佐藤 肇一，”聴覚フィードバックが作業能率と疲労に及ぼす影響 —仮想旋盤による手送り突切り作業の場合—”，精密工学会誌，Vol.61, No.9, pp.1317-1321(1995)

[大浦 96] 大浦 容子，”熟達化”，認知心理学 5 学習と発達，東京大学出版会，pp.11-35(1996)

[畑村 89] 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予稿集，pp.297-298(1989)

[Ibaraki 02] Soichi Ibaraki, Takashi Ogawa, Atsushi Matsubara, and Yoshiaki Kakino, ”Model-based Learning Control of Cutting Forces in End Milling Processes,” Proceedings of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation (JUSFA), vol. 1, pg. 401-408(2002)

[Tsai 91] Tsai, M. D. and Takata, S., 1991, Operation Planning Based on Cutting Process Models, Annals of the CIRP, Vol.40, No.1, pp.95-98(1991)

第4章　機械加工状態の多相的モデリングと高精度加工シミュレーション

本章では，加工状態予測に用いる加工シミュレーションについて述べる．これまでも数多くの加工シミュレーションに関する研究が行われてきた．しかしながら，作業者支援という観点からは，予測の信頼性についての検討がなされていないという点で課題が残っている．本章ではまず，本研究で提案する多相性を考慮した機械加工プロセスの状態表現について概説する．ここでは，断片的なシミュレーション結果を関連付けるための枠組みの提示を行う．続いて，従来研究されることの少なかった，ボールエンドミル加工に対する高精度切削力予測について示す．そして，予測の信頼性を向上させるための手法である，モデル学習について説明する．

4.1　多相的加工状態表現

4.1.1　従来の加工シミュレーション

エンドミル加工に関連する加工現象を (1) 作業者により直接変更可能な変動項目，(2) 加工結果に影響する加工現象，(3) 加工に対する評価尺度，の観点から整理すると表 4.1 のようになる [臼井 90] [中山 78] [竹山 80].

このような複雑なプロセスを取扱うにあたって，全てを一括して取り扱うことは困難であるので，これまでの多くの研究では，物理相の選択と対象範囲の限定という 2 つの簡単化を行って個別の分析を行ってきた.

第一の簡単化である物理相の選択とは，加工状態を，静的弾性変形，熱伝達，振動現象などのように特定視点に基づいて記述し，予測や評価を行うことである．例えば，加工精度に着目する場合には，図 4.1 に示すように，静弾性，熱変形，振動といった相に分割した後，それぞれの相での独自の加工状態表現を用いて，加工プロセスがモデル化されてきた．このような分割は，経験的に行われているもので，どのような解析手段が適用可能であるかといった事柄にも影響される．また，例えば,「工具変位を考える際には，熱の効果は考えない」というように，異なる相ごとのモデルは独立に取り扱われることが多い.

続いて，第二の簡単化である対象範囲の限定とは，加工に寄与する様々な現象のうち，考慮の対象とする範囲の限定を行うことである．図 4.2 に示すように，加工においては多くの構成物 (エンティティ) が工具と工作物の間の相対運動の実現に寄与している．これらの構成物の振る舞いや関係の仕方により加工現象は変化する．しかしながら，全ての構成物および関係について記述することは困難であるので，工具の変位に限定した加工評価や [Takata 89]，工作物と把持具の変形に限定した評価 [帯川 93] などのように，加工に寄与する構成物のうち影響が大きいと考えられるものに注目して解析が行われてきた.

このような簡単化が行われてきたのは，これまでの加工シミュレーションの用途が，切削過程における支配的な現象解明のための一般的解析を目的とした，いわばプロセス理解のための道具としての用途に偏っていたためであると考えられる．また，従来の加工誤差予測の対象が，金型加工や航空機部品加工といった個別の対象を想定していたことも，工具－主軸系の変形や

表 4.1 エンドミル加工にける物理現象

変動項目	加工現象	評価尺度
工具材質	カスプ	加工精度
工具形状	工具干渉	・形状精度
被削材質	直線近似誤差	・寸法精度
工作物形状	工具形状誤差	
工具経路	工具振れ回り	
（切り込み量）	工作物取付誤差	加工品位
切削速度	工作物の弾性変形	・あらさ
送り量	工具系のたわみ	・うねり
把持具形状	工作機械の弾性変形	・加工変質層
把持位置	びびり振動	・残留応力
把持方法	機械的工具磨耗	
工作機械特性	工作物の熱変形	
潤滑，雰囲気	工具熱変形	工具寿命
環境温度	熱的工具磨耗	
	加工硬化	加工時間
	工作機械の熱変形	
	不良切削（むしれ）	最大切削力
	こばかけ	
	ばり	振動安定性
	切りくず	
	構成刃先	

工作物熱変形といった単一の物理現象の影響のみを考慮した評価しか行われなかった理由のひとつであると考えられる．

しかしながら，近年の高精度加工への要求により，複数の誤差因子を多面的に評価する必要が生じている．さらに，本研究は，小ロットでの多様な加工対象に対する個別的な支援を目的としているので，個別事例に対する事前検証ツールとしての信頼性が重要となる．このような状況では，支配的な現象を事前に規定することは困難である．すなわち，適宜，作業者によって物理相や対象範囲の限定が行えるような環境が必要であると考えられる．

さらに，本章で議論の対象としているマクロスコピックな現象のモデルには，事前の実験によって同定されるモデルパラメータが存在する．このパラメータの同定は，通常のシミュレーション研究においては問題にされることは少ないが，どのような条件で同定されたパラメータであるかは，予測結果の信頼性に大きく関係する．事前に解析対象の変化の範囲が想定できれば，十分な予備実験により適切なパラメータ同定が行えるものの，新たな工具への対応や可能性のある加工条件の組み合わせを事前に網羅することは困難である．このような場合には，パラメータ同定を行った加工状態とこれから予測を行う加工状態がどの程度類似しているのかは大きな問題となる．

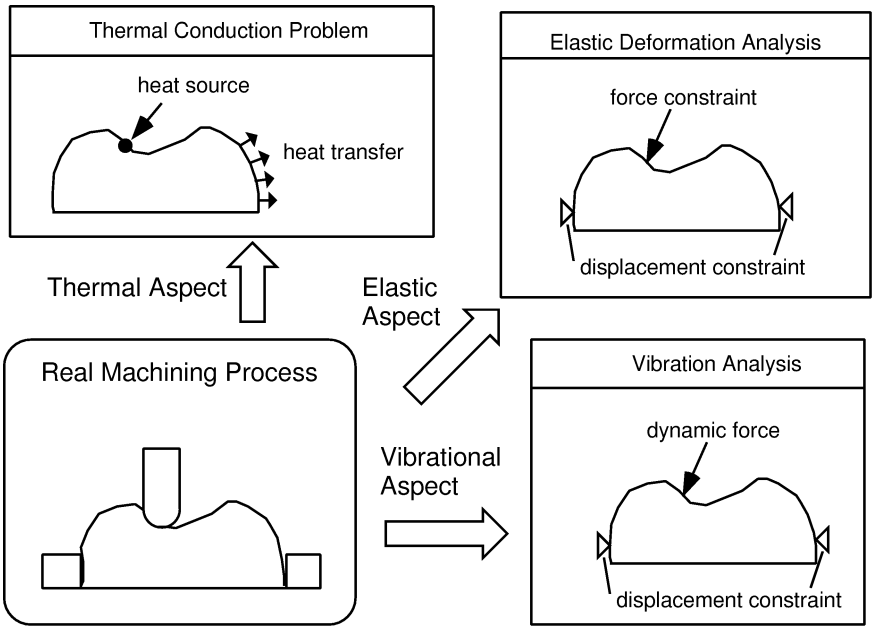


図 4.1 相に分割されたプロセスモデル

以上の議論を整理すると，作業者支援においてシミュレーションを利用する場合には，単に予測結果を提示するだけでは不十分であり，予測結果がどのような前提や処理によって導出されたのかという情報も併せて示されることが必要である．

そこで以下では，断片的にモデル化されたシミュレーション手法を用いて求められた個々の予測結果を総合的に評価することについて検討する．ここでは，上述の対象の限定や物理相の選択といった簡単化の過程やモデルパラーメータの同定を考慮したシミュレーションの利用について考察を加える．

4.1.2　断片的なシミュレーション結果の統合における課題

前節で述べた議論を整理すると，加工現象を分析する上で行われる簡単化は，経験的かつ恣意的に行われている．さらに，モデルの同定においては，簡単化されたモデルを前提としたパラメータ同定が行われる．すなわち，着目する相に属する変数以外の影響は，予備実験で事前に決定するモデルパラメータに含め，直接的な評価は行わないことになる．これは，個々の断片的な情報の間に暗黙的な依存関係が成り立っていることを意味し，形式的に同等な状態量であっても前提や近似が異なっていると考えられる．従って，断片的な結果を論理的に統合して現象の精緻な予測を組み立てることは困難であると言える．しかしながら，このような断片的な予測結果を，作業者に対して関連付けて提示することにより，作業者の経験的な状態推定を支援することは可能であると考えられる．これは，断片的シミュレーション結果を，個々の事例を特徴付けるインデックスとして用いることに相当し，この予測を踏まえた実際の加工体験は，経験に対する解釈を容易にし，対象の理解を強化することが期待できる．

ここで，異なるモデルに基づくシミュレーションを作業者に提示するためには，個々の予測

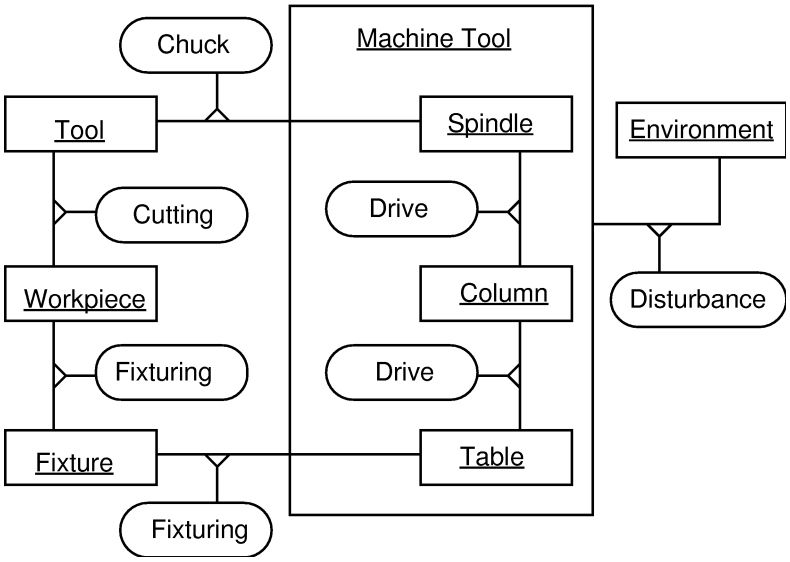


図 4.2 加工を構成する構造の記述

結果の対応付けを適切に行うことは不可欠である．プロセスモデルは状態表現とその更新手続きによって規定されるが，状態表現および状態更新手続きは，多くの場合独自の基準に基づいて設定される．従って，断片的に推定された状態量を統合するに当たっては，以下のような問題点がある．

状態量の非整合的重複 例えば，ひずみや変位といった本来一意に決定されるはずの状態量が，複数のシミュレーション間で個別の近似により非整合的に重複して異なる値を持つこと．

依存関係の不定性 同等に参照可能な状態量が複数あることからシミュレーションにおける情報の依存関係も複数存在する．また，その一部は依存関係のループを形成し決定が困難になる．

状態更新の非同期性 状態更新が異なるシミュレーション結果の間では，情報の対応関係を導出するのが難しい．

これらの問題に対して，以下では，本研究で提案する幾何モデルを中心としたモデル統合と，モデル学習を考慮した加工プロセス表現について概要を示す．また，異なる状態間での対応関係の導出手続きについても，以下で説明を加える．

4.1.3 多相加工プロセス表現

前節で述べた課題のうち，状態量の重複は，加工誤差などの形状評価において顕著な問題となる．典型的な状況としては，力学的に評価した加工誤差と熱力学的に評価した加工誤差が導出されたとき，両者を統合して評価する問題が考えられる．そして，依存関係の不安定性は，この状態量の重複に起因する問題である．そこで，本研究では，図 4.3 に示すように，物理的

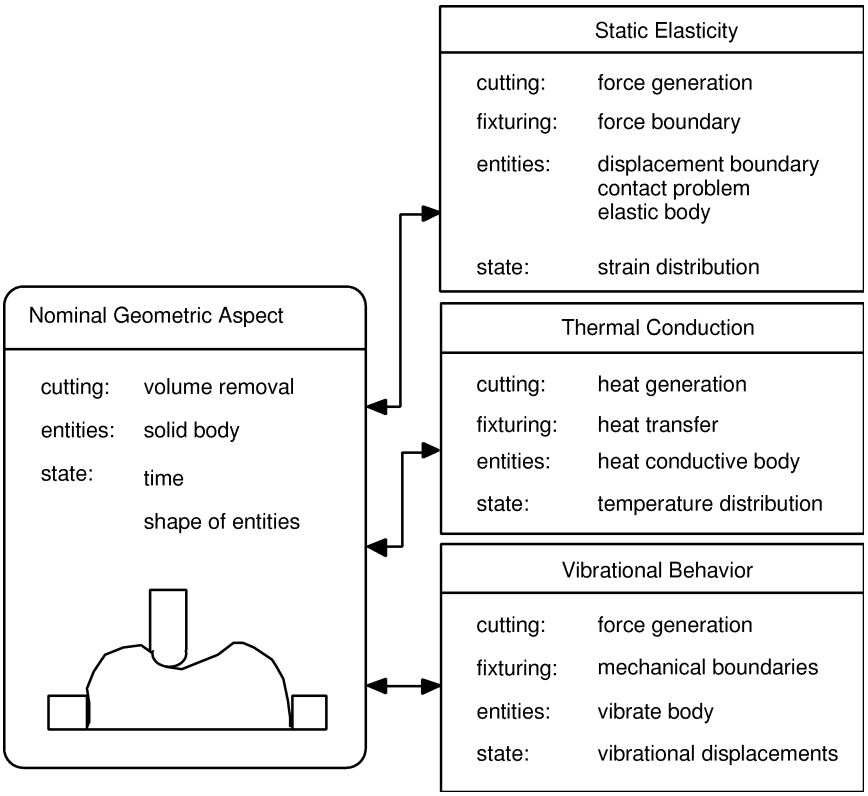


図 4.3 相に分割されたプロセスモデル

影響を反映しない幾何形状シミュレーションから導出される状態量を，異なるモデル間での状態量の標準的な近似量として用いることとし，参照情報を一元化する．これは，物理情報の因果関係のループを，形状を中心とした 1 対 1 関係の集合に分割することを意味する．

そして，個々の相での計算から得られた状態量を併用して加工状態を推定する手続きについては，作業者の経験的な状態の関連付けにより実現されるものとする．ただし，実施の加工に際して何らかの計測情報や事例を特徴付ける情報がある場合には，過去の事例に対する断片的な予測結果と計測結果をもとに，経験的モデリング手法を用いて関連付けを支援することも原理的には可能である．以上の状態推定の枠組みを含めた加工プロセスの表現の概要を図 4.4 に示す．

4.1.4　対応関係の導出手続き

異なる相の間での依存関係については，前章の枠組みの提案によって回避すること可能である．しかしながら，断片的な予測結果を適切に関連付けて提示するためには，少なくとも，同じ加工状態に対応した予測結果について個別の予測結果群の中から適切に選択して関連付けることが必要となる．加工に関するシミュレーションプロセスの状態更新は，図 4.5 に示すように以下の 3 つのタイプに分類できる．このほか，実プロセスの制御などを行う場合には，これらと実時間との対応付けも必要となる．実時間情報は以下に示す A-type の情報と親和性は高いものの，処理や関係の導出に対する処理時間の制約が生じることになる．

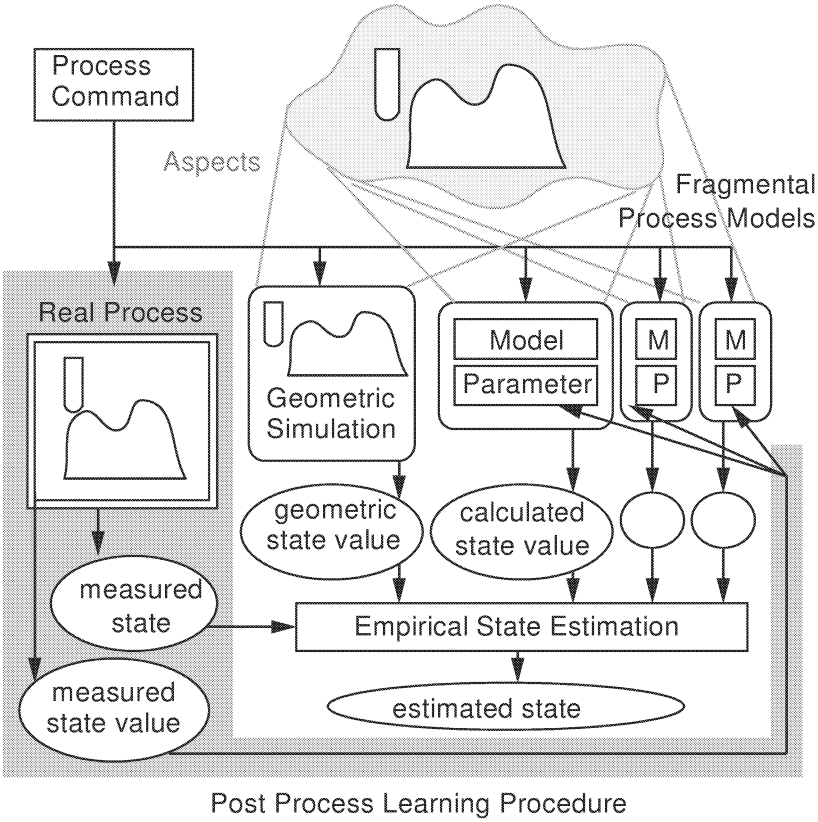


図 4.4 加工プロセス表現の概要

時間駆動型状態更新 (A-type) 熱伝導解析における偏微分方程式の時間差分計算に代表される，シュミレーションを行う対象世界での時間を基準とした状態更新.

工具移動駆動型状態更新 (B-type) NC 加工における 1 ブロックごとの形状変化シミュレーションに代表される，工具の移動量を基準とした状態更新.

恣意的な離散化に基づく状態更新 (C-type) 工作物弾性解析や振動解析のように，逐次シミュレートする必要がなく，計算時間の観点から冗長に評価を行うことが困難な場合に用いられることが多い．恣意的に解析者が状態評価を行う点を設定する状態更新.

加工状態の多面的な評価を行うためには，異なる状態更新手法の状態間での対応付けを行うことが必要となる．B-type のシミュレーションの状態（図 4.5 中 $m\gamma$）に対応する A-type シミュレーションの状態 $t\alpha$ は，NC コードの解析を行うことによって導出可能である．この対応付けを事前に行い，時間と NC ブロックの対応表を作成しておくことにより A-type と B-type の対応付けが可能となる．また，C-type の状態更新手法で状態を指定する時には，解析者は工作物形状もしくは工具位置をもとに状態の指定をすると考えられる．すなわち，恣意的な離散化における状態指定そのものを記録することにより $a\delta$ と $m\gamma$ の間の対応付けを行うことは可能である．これらの記録を全ての $a\delta$ について行えば，B-type と C-type の対応付けも可能となる．この関係を図 4.6 に示す.

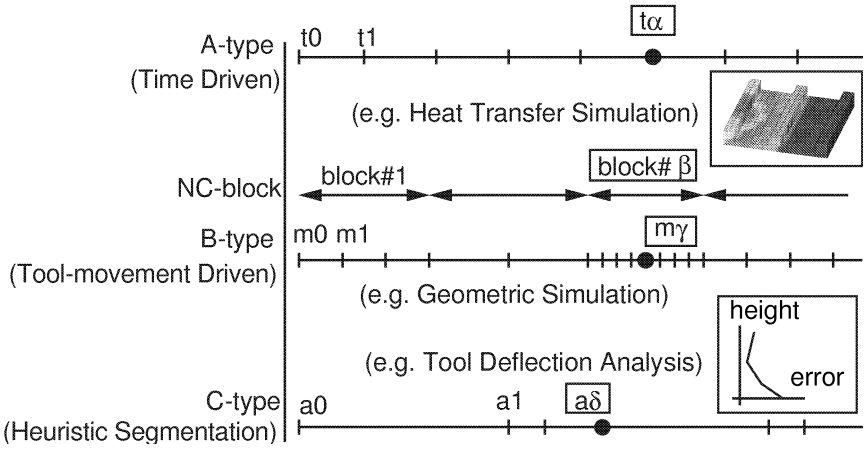


図 4.5 シミュレーションの状態更新のタイプ

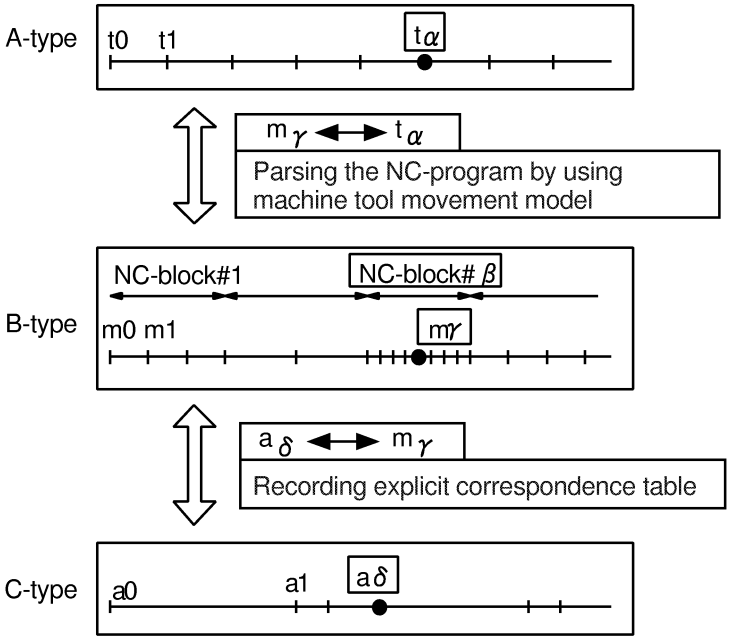


図 4.6 状態間の対応関係の導出

以上説明した対応付けの手法を用いて時間駆動シミュレーションの熱伝導解析結果と形状変形駆動シミュレーションの切削力解析結果，恣意的状態更新の工具変位解析の誤差を対応付けた例を図 4.7 に示す．ここでは，形状シミュレーションによる形状変化の履歴は，NC コードの解釈により時間情報へと関連付けられる．さらに，工具変位解析を行う工具位置については，高田の提案する加工シナリオ [Takata 93a] と同様の状態の記述手法を導入することにより，誤差解析を行った状態の工具位置および NC コードのどの部分であるかを明示できる．そして，この情報は NC コードの解釈を経て時間情報へと関連付けされる．以上の議論により，3 つの異なる状態更新の予測結果について相互に対応付けが可能であることが示された．

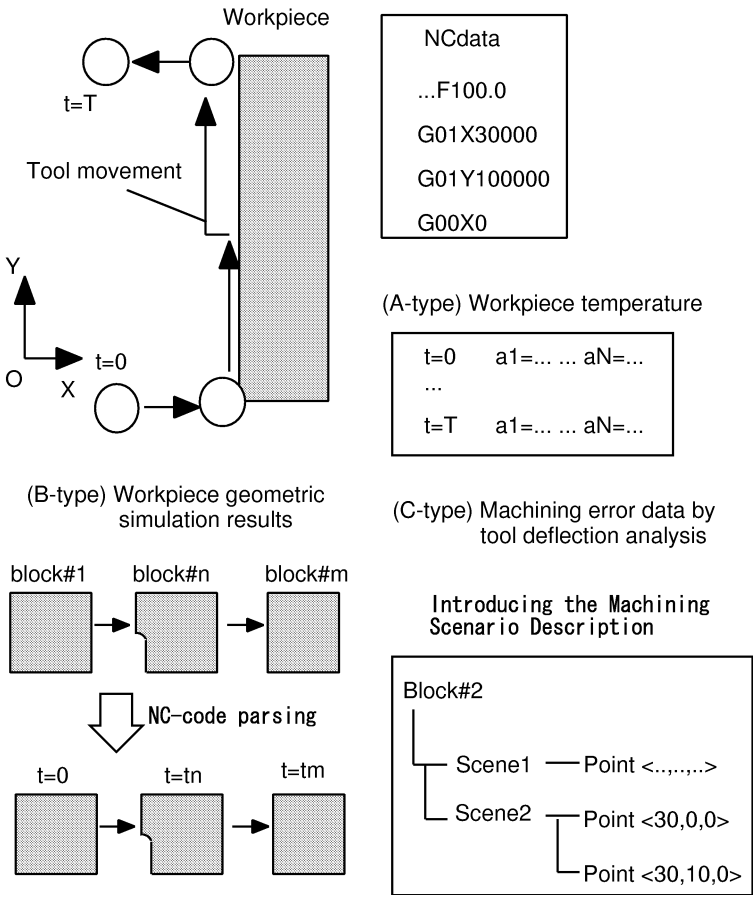


図 4.7 加工状態の対応付けの例

4.1.5 加工対象表現に関するまとめ

断片的な加工シミュレーション結果を統合して加工プロセスの多面的な評価を行うための問題点として，状態量の非整合的重複，依存関係の不定性，状態更新の非同期性の 3 つがあることを指摘した．そして，指摘した問題点を克服するための加工対象表現と状態更新手続きについて述べた．

また，本節で示した状態記述の枠組みは，シミュレーションシステムの再利用を可能とし，加工プロセス情報の計算機可読性を向上させることにより，仮想生産 [Onosato 93] や教育などの多様な用途で加工情報を利用することが可能となると考えられる．

以上，断片的なモデルを関連付けて作業者に提示することを提案してきたが，このような枠組みが実用化されるためには，個々のシミュレーションモデル群が事前に構築されていることが前提となる．ここで，表 4.1 の現象の中で，重要性がありつつも十分に研究が行われていないものについて検討する．

まず，カスプや工具干渉の評価などの幾何学的な誤差に対しては，幾何モデルに基づく幾何シミュレーションを用いて評価が可能である．また，スクエアエンドミル加工の研究の結果から，エンドミル加工において最も影響の大きい加工誤差生成因子は，切削力による工具，工作

機械と工作物の間の相対変位であると言われている [藤井 86]．ボールエンドミル加工においても，この傾向は変化しないと考えられる上，切削熱による熱変形解析にも流入熱量計算の基本情報として切削力は不可欠である．以上のことから，エンドミル加工において，切削力が極めて重要かつ基本的な物理量であることが分かる．

これまでの研究例を検討した結果，工作物の弾性変形，熱変形，工具系の変位，工作機械の変形などの研究はスクエアエンドミルに対しては，すでに個別の解析手法が確立されているので，上述の加工プロセス表現を基に連携させることにより，多面的な評価の作業者への提示が可能である．しかしながら，ボールエンドミルに関しては，幾何学的な形状評価に関する研究がほとんどであり，工作物形状を考慮した切削力推定に関する研究は少ない．それは，ボールエンドミルにおける切削領域の判定には高精度な形状表現が不可欠である上，工作物形状により切削に寄与する切れ刃の部分が異なるため，切削状態が大きく変化する複雑な切削過程となるからであると考えられる．ボールエンドミル加工においても，切削力が高精度に推定できれば，推定された切削力を基に誤差モデルや熱変形モデル，振動モデルなどへの拡張は原理的にはスクエアエンドミルと同様に行えると考えられる．

そこで，以下ではこれまでに研究が十分に行われていないボールエンドミル加工における切削力シミュレーションについて解析手法を示す．また，パラメータの同定過程を考慮に入れたプロセスモデルの更新手法についても提案を行い，検証を行う．

4.2　ボールエンドミル切削加工シミュレーション

加工シミュレーションは実際の加工を行う前に，加工状態を予測し，その予測結果に基づいて加工条件を評価するために用いる．すなわち，従来行われてきた試し削りに相当する機能が要求される．このような機能を有するためには，対象とする加工プロセスを精度良く表現するモデルが必要となる．

加工精度を悪化させる要因として，物理的要因と幾何学的要因の二つがあげられる．ここで物理的要因とは，加工時に発生する力学的，熱的な現象に起因するものであり，幾何学的要因とは指令として与える NC データに含まれる幾何学的な不備のことである．これらの要因を考慮できるシミュレーションシステムは，

- 加工プロセスの物理現象を記述する物理モデル
- 被削材と工具を精度良く表現できる幾何モデル

の二つを有する必要がある．前節での議論において，ボールエンドミル加工での切削力の推定が行われれば，既存の手法によって多くのシュミレーションが可能であることから，まず，第 4.2.1 節において，切削力のモデル化を行う．第 4.2.2 節においては加工プロセスの幾何学的なモデル化について述べる．また，第 4.2.3 節においては，試作システムの構成とシミュレーションの流れについて述べる．

4.2.1 ボールエンドミル加工の切削力モデル

切削力には，表 4.1 に挙げた変動項目の多くが関係する．さらに，それぞれの影響の程度も，1) 摩耗の度合，2) 構成刃先の有無，3) 切屑の状態，4) びびりの発生，などによって大きく変化する．

切削力を求める手法としては，第 2.2.1 節で述べたようにいくつかの方法がある．本研究では，切削力モデルのモデル化の基本的な考え方として，工具切れ刃を微小部分に分割し，各微小切れ刃での切削力を個々に求め，微小切削力を重ね合わせることによって工具にかかる切削力を求めるという手法 [Tsai 91][Yang 91] を用いる．

このようなアプローチは，切屑の内部での干渉による塑性仕事を明示的に考えないということであり，近似的な解法となる．しかしながら，1) 工具の形状に対して柔軟に対応できる，2) パラメータの数が少ない，3) アルゴリズムが計算機向きである，という利点が大きい．

具体的に，切削力を求める式を定式化する．まず，送り，回転数，工具運動方向の関係を求める．ボールエンドミルは，自由曲面の加工など 3 次元の運動を行う工具であるので，3 次元運動のモデル化について考察する．いま，図 4.8 のようなボールエンドミル加工を考える．水平面となす角が ϕ の方向に工具が進行しているとする．

図 4.9 に示すように，絶対座標，工具とともに回転する座標，各切れ刃に対する局所座標を定義する．図 4.9 において ψ は工具の回転角度を表し，α は切れ刃の位相差を表す．ここで，各微小切れ刃について $\theta = \alpha + \psi$ を定義する．一刃あたりの送りを f[mm/tooth] とする．一回転ごとに仕上げられる曲面は，球で近似できるので [高崎 87]，このときの図 4.10 の微小切れ刃 j の実質切り込み量 h は，図 4.11 の球と直線の交点の計算から，

$$h = r - \sqrt{f^2 \cdot (p^2 - 1) + r^2} + f \cdot p$$

$$p = \cos\phi \sin\varphi \sin\theta - cos\varphi \sin\phi$$

となる．ここで，r は工具の半径，ϕ は工具経路と水平面のなす角，φ，θ は図 4.9，4.10 で示される切れ刃の座標から求まる角度である．この h を用いて，微小切れ刃の切削断面積 ΔA は，

$$\Delta A = \int_{\varphi}^{\varphi + d\varphi} h|_{\theta = const} d\varphi$$

となる．これを切れ刃の進行方向に垂直な平面への投影長さ dl を用いて，

$$\Delta A \simeq h \cdot dl$$

で近似する．

本研究では，簡単化のため 2 次元切削の近似 [Tsai 91] を用いる．ただし，モデルとして傾斜切削近似 [Yang 91][白瀬 86] を用いることも可能である．

具体的には，微小切れ刃に垂直な面内での加工を，2 次元切削状態で近似する．切削力の計算においては，切削断面積に比例する項と切れ刃の長さに比例する項を考える [中山 78]．このように 2 つの項を考えることによって切り込み量に対する被切削力の寸法効果を表すことができる．また，速度の効果は線形性を仮定する．これらのモデルの妥当性については，学習過程において求めるモデルの評価値によって検証できると考える．

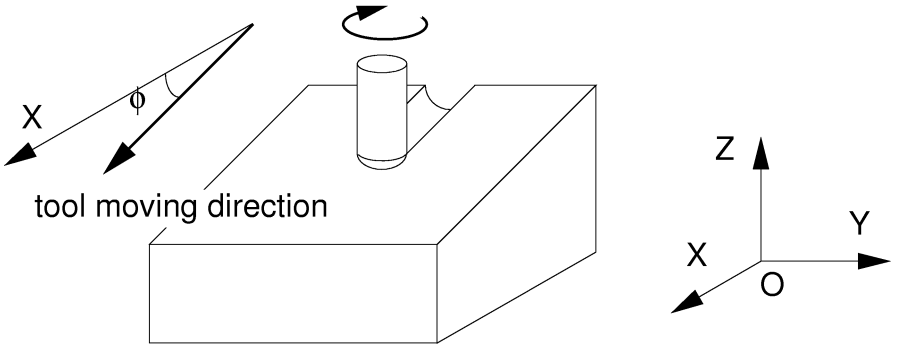


図 4.8 ボールエンドミルを用いた傾斜平面の加工

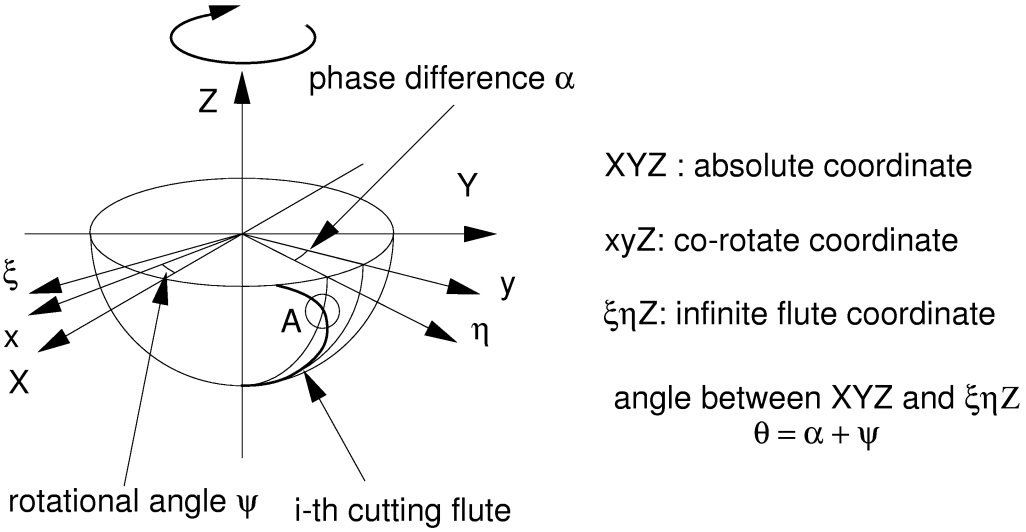


図 4.9 回転座標系と切れ刃座標系

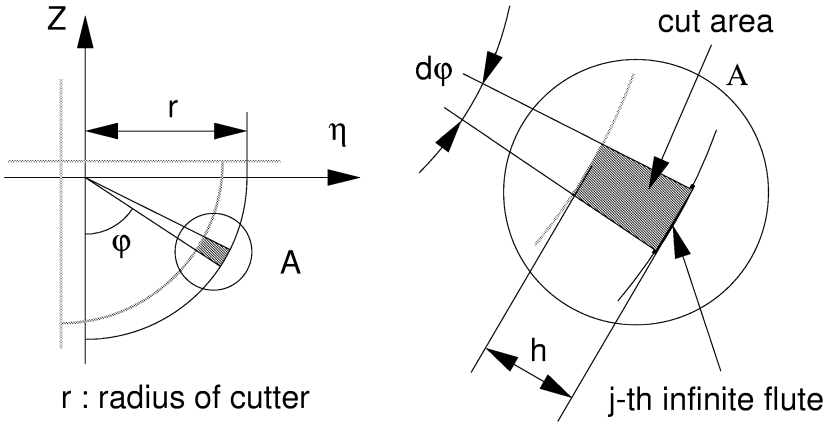


図 4.10 微小切れ刃による切削

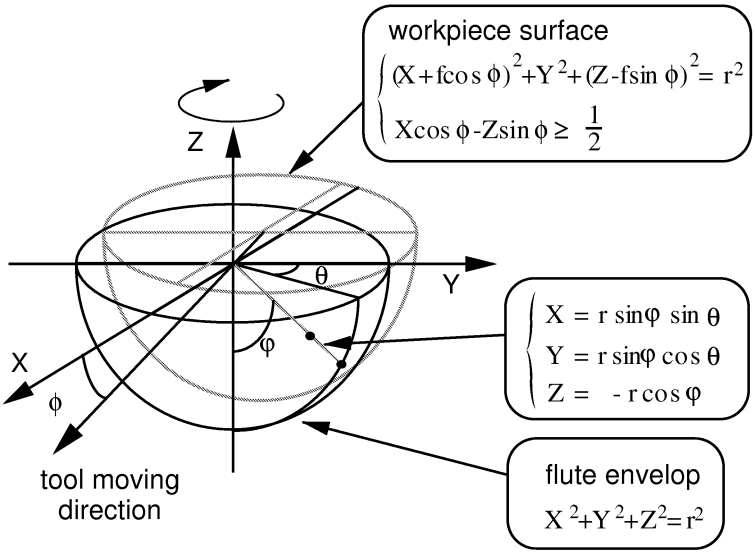


図 4.11 微小切れ刃の実質切り込み量

ここで，切削断面積に比例する項および切れ刃長さに比例する項の係数パラメータを c_{v1}, c_{f1} および c_{v2}, c_{f2} とし，切削速度に関する係数パラメータを K_{vv}, K_{fv} とする．この切削力モデルに含まれるパラメータ $\mathbf{K} = (c_{v1}, c_{v2}, c_{f1}, c_{f2}, K_{vv}, K_{fv})$ を用いて，微小切削力の主分力成分 f_v，背分力成分 f_f を表す．実質送り量を h，切削速度を V とすると，f_v, f_f はそれぞれ，次式のように表される．

$$f_v = (c_{v1} + \frac{c_{v2}}{h}) \cdot (1 - K_{vv} \cdot V) \cdot \Delta A$$

$$f_f = (c_{f1} + \frac{c_{f2}}{h}) \cdot (1 - K_{fv} \cdot V)) \cdot \Delta A$$

ここで，i 番目の微小切れ刃での切削力 f_v, f_f を，xyz 座標の切削力 $\mathbf{f^{xyz}}$ に変換する．各微小切れ刃の傾きを γ_i とすると，

$$\begin{bmatrix} {f_x}^{xyz} \\ {f_y}^{xyz} \\ {f_z}^{xyz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_v \cdot \cos\gamma_i \\ f_v \cdot \sin\gamma_i \\ f_f \end{bmatrix}$$

となる．絶対座標 XYZ での微小切削力 $\mathbf{f^{XYZ}}$ は，各切れ刃での位相進み角と回転角の和 $\theta_{i,j}$ を用いて，

$$\begin{bmatrix} {f_x}^{XYZ} \\ {f_y}^{XYZ} \\ {f_z}^{XYZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i,j} & \sin\theta_{i,j} & 0 \\ -\sin\theta_{i,j} & \cos\theta_{i,j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {f_x}^{xyz} \\ {f_y}^{xyz} \\ {f_z}^{xyz} \end{bmatrix}$$

となる．この微小切削力を加え合わせることによって全体の切削力が求まる．よって工具にかかる切削力 $\mathbf{F}$ は座標変換行列を $\mathbf{T}$，微小切れ刃垂直面内の切削力を $\mathbf{f}(\mathbf{K}, h, V)$ として，

$$\mathbf{F} = \sum_i \sum_j \mathbf{T} \cdot \delta_{i,j} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{K}, h, V) \tag{4.1}$$

と表すことができる．ここで，関数 $\delta_{i,j}$ は，刃数を表す添字 i と微小切れ刃を表す添字 j を用いて i, j 切れ刃の干渉を表す関数であり，

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & (if \quad i, j \ flute \ is \ cutting) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$

で定義される．関数 $\delta_{i,j}$ は幾何シミュレーションを通して求めることができる．

4.2.2　切削加工の幾何学的モデリング

本節では，切削加工シミュレーションにおける幾何計算について検討する．一般にボールエンドミル加工で加工される工作物の要求形状は複雑な 3 次元曲面であり，曲面を表すパラメータも様々である．一方で，加工に用いる工具は，一般に簡単な解析関数で表現可能である．工作物形状は工具形状が転写されると仮定すると，加工によって得られる工作物の形状は，簡単な解析関数の集合として表わすことがでる．

工作物の初期形状を $\mathbf{M}_0$，第 i パスでの工具掃引形状を $\mathbf{g}_i$ とすると，第 i パスの加工終了時の工作物形状 $\mathbf{M}_i$ は，

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_0 - \sum_i \mathbf{g}_i$$

で与えられる [Wang 87]．この $\mathbf{M_i}$ と要求形状の差を評価するのが従来の幾何シミュレーションである．一般に $\mathbf{g_i}$ の数は非常に多数であるのでその記憶方法が問題となる．

従来の研究では精度を重視して B-rep や CSG といったソリッドモデルを用いる方法 [山崎 92] [川島 90] と，計算効率を考慮して Z-map[Takeuchi 89]，Z-buffer[Tsai 91]，Voxel[岸浪 89] などの近似的な手法 (Decomposition Model) を用いる方法が提案されていた．前者では計算時間が膨大になってしまうという問題点があり，後者では表現精度に問題があるため，実質的にシミュレーションを行える範囲が限られていた．この原因としては，これらの方法が一般的な幾何モデリング手法を，加工シミュレーションに用いていることがあげられる．すなわち，切削加工シミュレーションに要求される幾何計算の特徴を考慮して，モデリング手法の評価を再度行うことが必要であると考えられる．加工シミュレーションで行う幾何計算には，次のような特徴がある．

1. 加工面を仕上げた工具掃引形状 ($\mathbf{g_i}$) を記憶すれば良い．
   $\Longrightarrow$ 全ての加工面に対して，一意に決定される形状が存在する．
2. 工具掃引形状は簡単な形状である．
   $\Longrightarrow$ 表現の対象が事前に規定できる．
3. 集合演算の場所は事前に規定できる．
   $\Longrightarrow$ 局所的な演算が有効である．
4. 切れ刃の干渉の評価を行うためには高精度な表現が要求される．
   $\Longrightarrow$ 近似面を作る方法は使用できない．
5. 切れ刃の干渉の評価は干渉の有無のみ判断できれば良い．
   $\Longrightarrow$ 明示的に対象の境界に関する情報をもつ必要は無い．

このような特徴に対して，どのような幾何モデルが有効であるかについて以下検討する．

局所的な集合演算を行うためには，空間を予め分割しておく Decomposition Model 的な手法が有効であると考えらる．また，表現精度を上げるためには，工具掃引形状を近似して記録するのではなく，明示的に記録する必要があることが分かる．すなわち，大域的な形状は Decomposition Model で保持し，切れ刃の干渉判定に用いる表面の微細な形状は，別途高精度な表現手法で補完し，両者を適切に関連付ける手法が有効であると考えられる．これは，形状の概略を評価する形状表現と干渉判定を行うための高精度な形状表現を併用する手法が有効であることを示唆している．ここで，2.5 次元の加工を考えると加工面上の点と一意に対応する水平面が存在する．すなわち，この水平面に含まれる格子点列と加工面上の点は一対一に対応する．各加工面上の点には対応する工具掃引形状が存在するので，ある水平面に含まれる格子列から工具掃引形状が一意に決定できる．このようなデータを記憶するには，図 4.12 に示すように各格子点がそれぞれ属する形状へのフラグを記憶する，P-map 法 [呂 90] が有効である．これは，Z-map 法の拡張であり，同様の手法として G-buffer 法 [Saito 91] がコンピュータグラフィックスの分野で提案されている．

本研究の特徴は，工作物を表現するのに特殊な近似関数を導入するのではなく，直接工具掃引形状を用いて高精度かつ高速演算可能な形状表現と干渉判定を実現しているところにある．また，ここでは，2.5 次元を対象とした実装手法について示すが，3 次元形状に対する拡張も実現可能である [Kaneko 02].

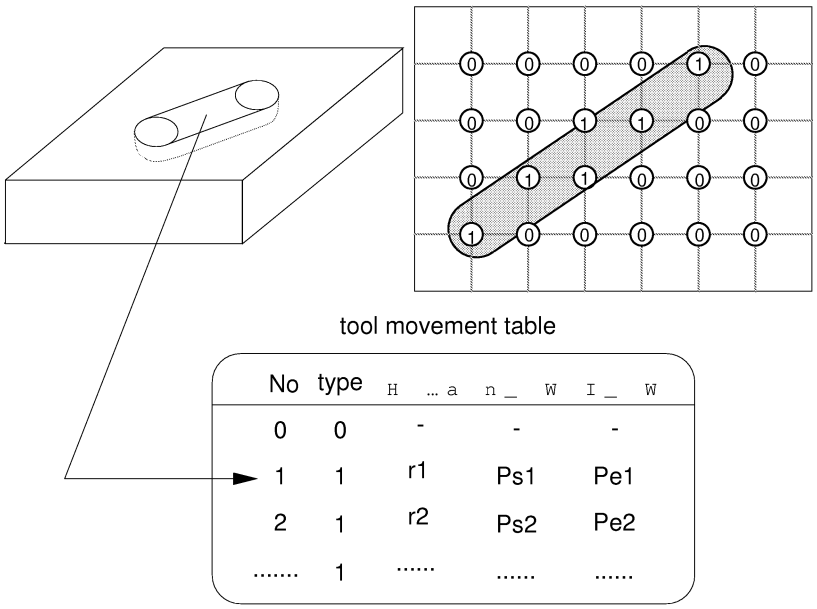


図 4.12 データの記憶方法

P-map 法は，各格子点が各々の属する図形の式を記憶することによって，格子点近傍での近似誤差をなくすことを目的とした手法である．本手法では，工具と工作物の干渉を計算する時には，近傍の格子点に記録された全ての工具掃引形状を再現して評価を行う．そこで，図 4.13 に示すように，ある工具掃引形状を再現するためには，最低限一つのグリッドが工具掃引形状を記憶していればよい．すなわち，メッシュの大きさが最小ピックフィード以下であれば，工

作物の形状を表現できる．

ここで精度の評価を簡単にしてみる．例えばピックフィードの最小値を $0.5mm$，最小工具半径を $8mm$，最大勾配を 60 度とすると，図 4.14 に示すようにカプス高さの最大値は約 $15.6\mu m$ となる．メッシュの大きさを要求される精度を実現するピックフィード以下にすれば加工の表現として十分である．また，計算速度の点でも Z-map，Z-buffer 等よりは遅くなるものの B-rep 等のソリッドモデルに比べてはるかに高速な演算が可能である．このことは，表現精度と併せてこのモデルを用いる利点として挙げられる．

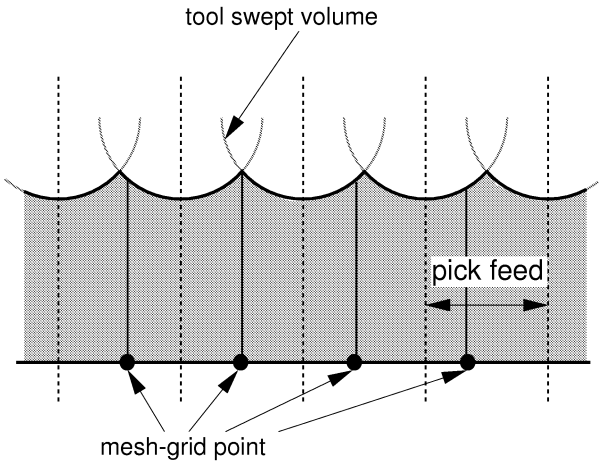


図 4.13 形状を記憶するために必要な最小メッシュ間隔

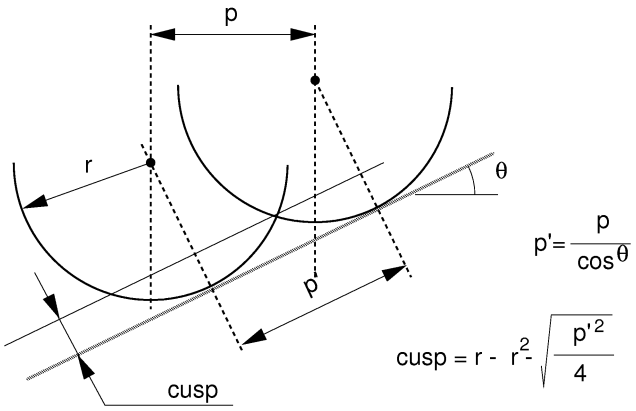


図 4.14 カスプの計算の例

次に，集合演算と切れ刃の干渉判定について述べる．工作物と工具掃引形状のセットオペレーションを行う方法は，基本的には Z-map 法と同様の手法を用いる．図 4.15 に示すように，格子点における被削材の高さの値が現在の経路の工具掃引形状より上にあるとき工具はその経路中で工作物を切削すると考え，格子点の持つ形状データを書き換える．すなわち，各格子点は，おのおの加工された加工経路の工具掃引形状の番号を記憶する．このような方法で工具経路での切削の有無を判断すると，ピックフィードや工具移動距離が格子点の間隔より小さい場合は加工面情報が欠落する．しかしながら，本研究ではメッシュの大きさを決めるときに，大まかな

加工の精度 (ピックフィード) を想定して，その範囲で切削過程をシミュレートする．このような理由で，想定した精度を越える加工 (例えば，上述の精度の計算の例では，カスプ高さ $15\mu m$ 以下の切削加工) を行う場合については取り扱う必要がない．すなわち，工具経路全体での加工の有無の評価は格子点での評価だけで十分である．

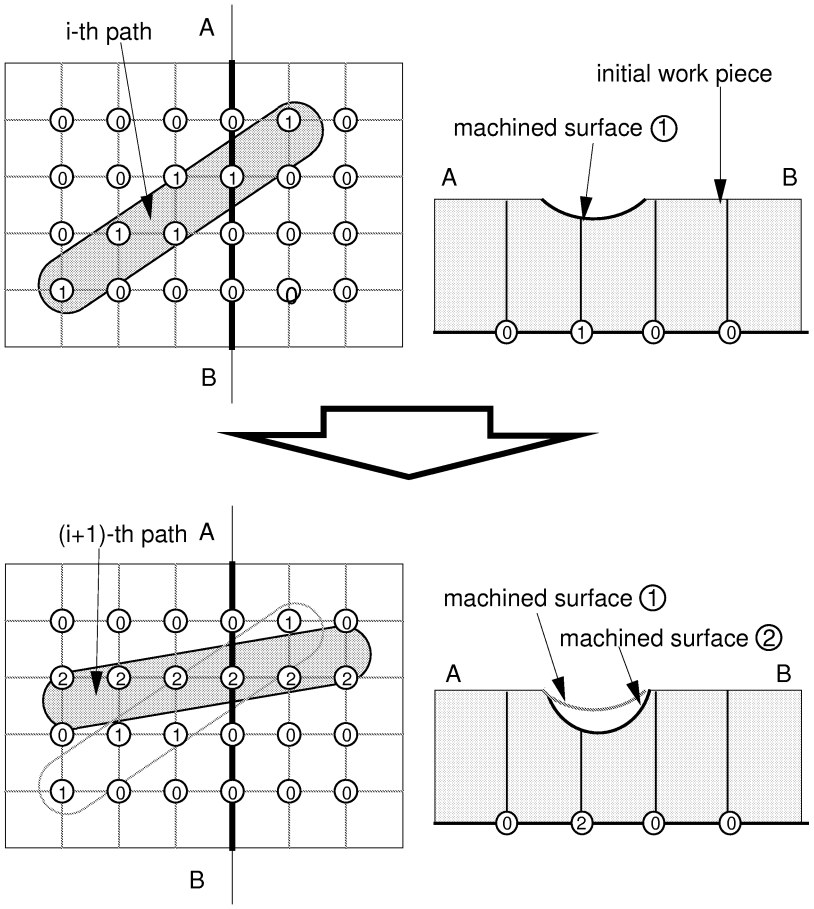


図 4.15 幾何シミュレーションの計算過程

また，本研究で用いる切削力の物理モデルは，切れ刃を微小切れ刃に分割して各切れ刃の受ける切削力の和として工具にかかる切削力を求めるので，集合演算によって得られた被削材形状と工具切れ刃の干渉状況の評価は，各微小切れ刃が被削材と干渉するかどうかを判定すればよい．即ち，事前に規定可能な有限個の点と過去の加工面との比較を行えばよく，収束計算などは不要である．この干渉状況の評価を行うとき，微小切れ刃の代表点は一般に被削材の格子点とは異なる．ここで 図 4.16 に示すように，Z-map 法では近傍の格子点の高さと切れ刃の高さを比較する．しかしながら，この近似の誤差は切削力の計算に大きく影響する．一方，本研究では，切れ刃の代表点近傍の被削材形状を，記憶しておいた曲面式から再現して干渉状況の判定を行うので，精度良く切削力の計算が行える．

つづいて，具体的な記憶データについて述べる．3 次元加工も微小な直線補間の継ぎ合わせと考えることができるので，ボールエンドミル加工の中で直線補間について考える．ボールエンドミル加工の直線補間の工具掃引形状の式は，直線の始点と終点の座標 $\mathbf{x_s}$，$\mathbf{x_e}$，工具径 r で

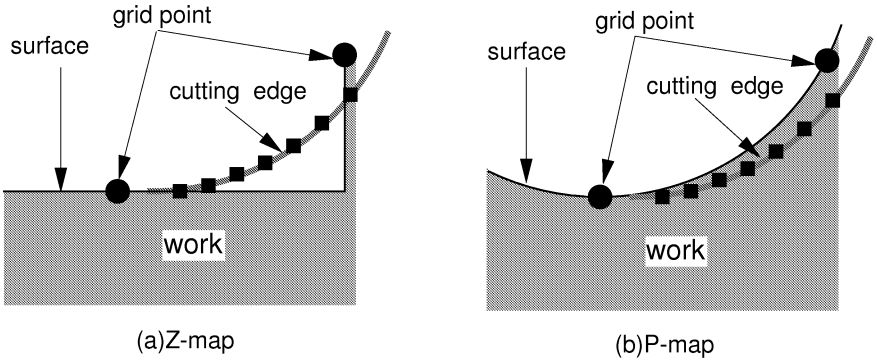


図 4.16 工具と工作物の干渉状況の判定

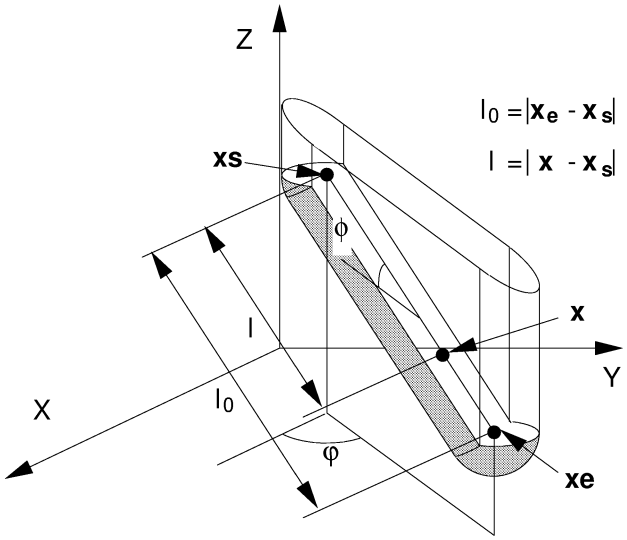


図 4.17 直線工具経路を表すパラメータ

表すことができる．計算の簡便さから図 4.17 のパラメータ l, ϕ, φ を用いて表す．ここで，l は工具移動距離で，ϕ, φ は，工具の進行方向を表す角度である．また，l は，$\mathbf{x}$ を用いて次のように表すことができる．

$$l = \{(x - x_s)\cos\varphi + (y - y_s)\sin\varphi\}\cos\phi + (z - z_s)\sin\phi$$

従って，工具掃引形状表面の高さ z は，円筒部分，始点近傍での球部分，終点近傍での球部分

の 3 つの解析関数によって次式のように表される．

$$z = \begin{cases} z_s + \dfrac{-(B+\sqrt{B^2-AC})}{A} & \left(0 \leqq l \leqq \sqrt{(x_e-x_s)^2+(y_e-y_s)^2+(z_e-z_s)^2}\right) \\ \\ z_s - \sqrt{r^2-(x-x_s)^2-(y-y_s)^2} & \left(l \leqq 0 \quad , \quad \sqrt{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2} \leqq r\right) \\ \\ z_e - \sqrt{r^2-(x-x_e)^2-(y-y_e)^2} & \\ \quad \left(\sqrt{(x_e-x_s)^2+(y_e-y_s)^2+(z_e-z_s)^2} \leqq l \quad , \quad \sqrt{(x-x_e)^2+(y-y_e)^2} \leqq r\right) & \end{cases}$$

ただし，

$$A = \cos^2\phi$$

$$B = -\sin\phi\cos\phi\{(x-x_s)\cos\varphi + (y-y_s)\sin\varphi\}$$

$$\begin{aligned} C = \sin^2\phi\{(x-x_s)\cos\varphi + (y-y_s)\sin\varphi\}^2 \\ +\{-(x-x_s)\sin\varphi + (y-y_s)\cos\varphi\} - r^2 \end{aligned}$$

である．上式のように各工具経路に対する工具掃引形状は，運動の始点，終点，工具径だけで表すことができる．すなわち，これらの情報を記憶すればこの工具掃引形状は以後再現可能であり，この工具経路で生成された任意の点は数値計算の誤差の程度で表現できる．

4.2.3 試作シミュレーションシステムの構成と処理の流れ

試作システムは，X ウインドウシステムおよび 3 次元グラフィックライブラリ Dorè と結合したシステムである．グラフィックライブラリをインストールすれば，X ウインドウシステムが動作する計算機で実行可能である．試作システムの構成を図 4.18 に示す．

処理の流れを簡単に述べる．工具が直線移動するたびに以下の処理を行う．ただし，加工シミュレーションは一定工具移動ごとに行うこととする．この移動量は任意に設定可能である．

まず，NC データと工具データから工具掃引形状を計算する．つづいて，直線に沿って，設定された移動距離ごとに工具を移動させ，各移動座標で工具一回転分の切削力を求める．

切削力の求め方は，一定回転角度ごとに，分割した微小切れ刃の工作物との干渉の評価を行い，干渉しているときには微小切削力の計算を行う．各回転角度ごとに，微小切削力を加え合わせ工具にかかる切削力を計算する．

全ての工具移動点で計算が終了したら，工具掃引形状と工作物の集合演算を行い，直線移動終了後の工作物を求める．

以上述べた方法で構築した試作シミュレーションシステムを用いて，図 4.19 に示す傾斜平面のボールエンドミル加工のシミュレーションを実行したときの画面出力の例を図 4.20 に示す．

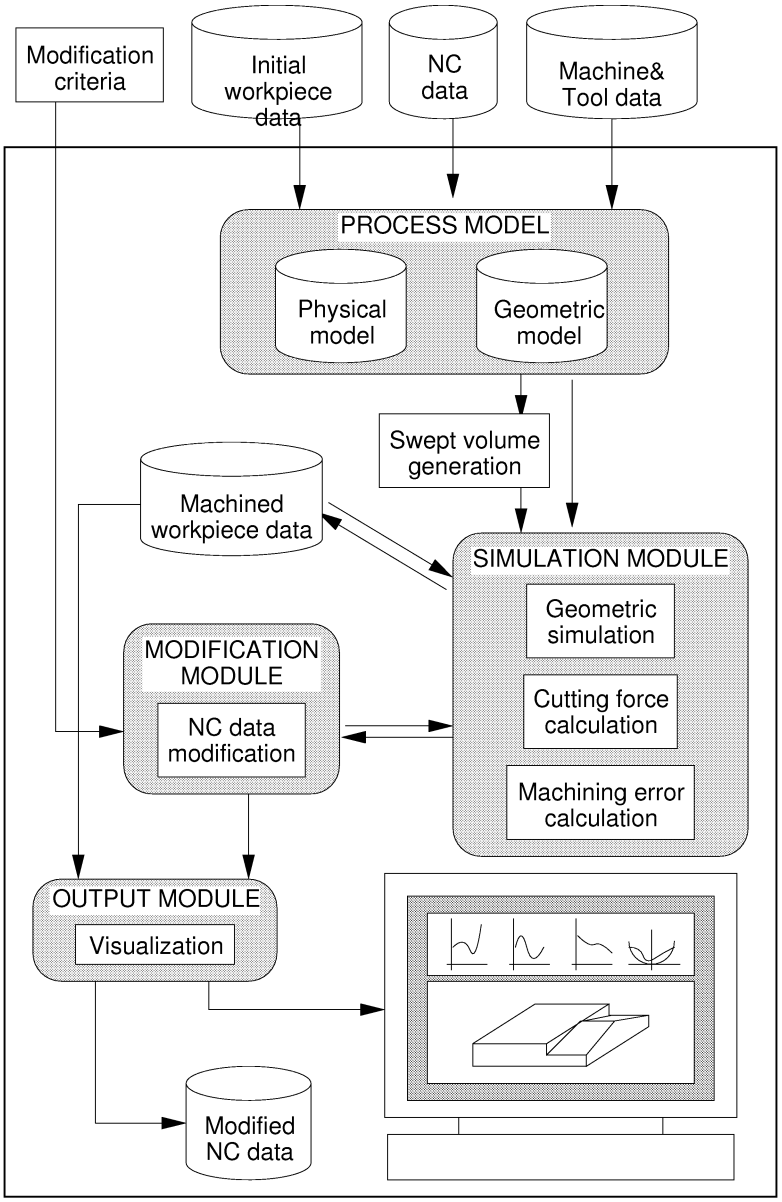


図 4.18 シミュレーションシステムの構成

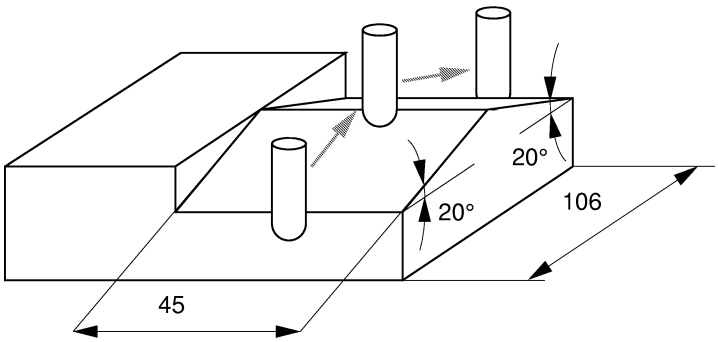


図 4.19 加工シミュレーションの例

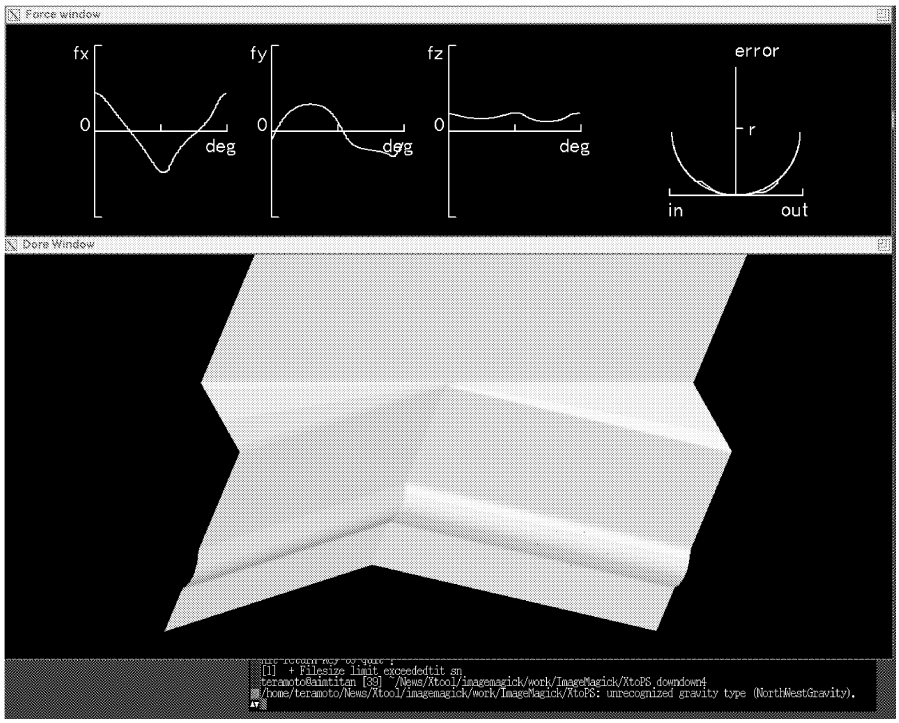


図 4.20 シミュレーションシステムの画面出力例

4.2.4 評価実験

本節では，評価実験の方法と結果について示す．試作システムの予測機能の評価実験として，従来の予備実験に基づく切削モデルによる予測の評価を行った．

予備実験に基づくモデル化の手法は [Tsai 91]，モデルに含まれるパラメータを，直刃のスクエアエンドミルを用いて，図 4.21 に示す側面切削加工を行うことによって決定するというものである．

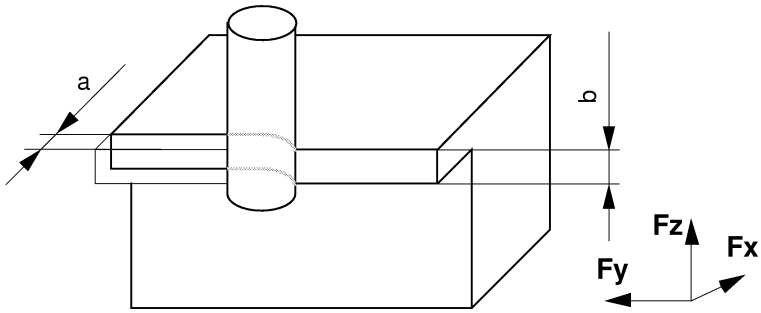


図 4.21 スクエアエンドミルによる予備実験

まず，$c_{v1}, c_{v2}, c_{f1}, c_{f2}$ を決定するために行った，予備実験の加工条件を表 4.2 に示す．

図 4.21 の a, b は $a = 3.0mm, b = 4.0mm$ であり，x, y, z 3 方向の切削力を動力計を用いて計測し，各切り込み厚さでの切れ刃の進行方向および垂直方向の切削力から最小二乗法によって

表 4.2 予備実験の加工条件

工作物材料	S50C
工具	直刃スクエアエンドミル
工具径	$\phi 16$
工具材質	P 種超硬
送り速度	0.1[mm/rev]
回転数	2000[rpm]

$c_{v1}, c_{v2}, c_{f1}, c_{f2}$ を求めた．

また，K_v, K_f は，同様の実験を工具の回転数を $400, 800, 1200, 1600, 2000[rpm]$ と変化させた場合にも行い，その結果から求めた．

このようにして求めたパラメータは，$(c_{v1}, c_{v2}, c_{f1}, c_{f2}, K_v, K_f) = (3.525 \times 10^9, 4.500 \times 10^4, 3.375 \times 10^9, 6.000 \times 10^4, 0.200, 0.200)$ となった．

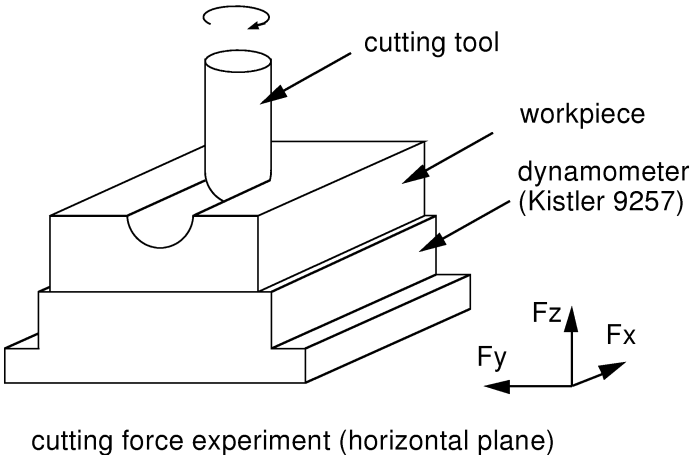


図 4.22 評価実験

以下では，予測モデルの定式化の妥当性を評価するために，まず，図 4.22 に示す水平面内の加工の条件と結果を示す．工具は，$\phi 16$ の 1 枚刃超硬ボールエンドミルを用い，被削材としては，構造用炭素鋼 S50C(HRB 約 95) を用いた．回転数 $2000rpm$，送り量 $0.1mm/rev$，で軸方向切り込みをそれぞれ，$0.5, 1.0, 2.0, 3.0mm$ と変化させて加工を行った．この時の，各条件での切削力の予測値と計測値を図 4.23 から，図 4.30 に示す．ここでの，予測値は予備実験によって，求まったモデルを用いて計算したものである．

また，送り量と回転速度を変化させた時の，側面方向最大切削力の予測値と，20 周期分の計測値の最大値と最小値の比較を，それぞれ図 4.31，図 4.32 に示す．

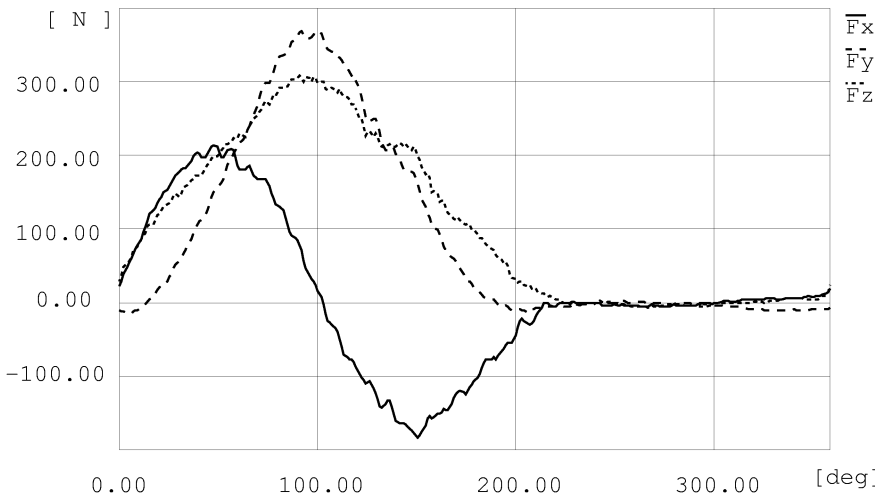


図 4.23 軸方向切り込み $0.5mm$ のときの計測値

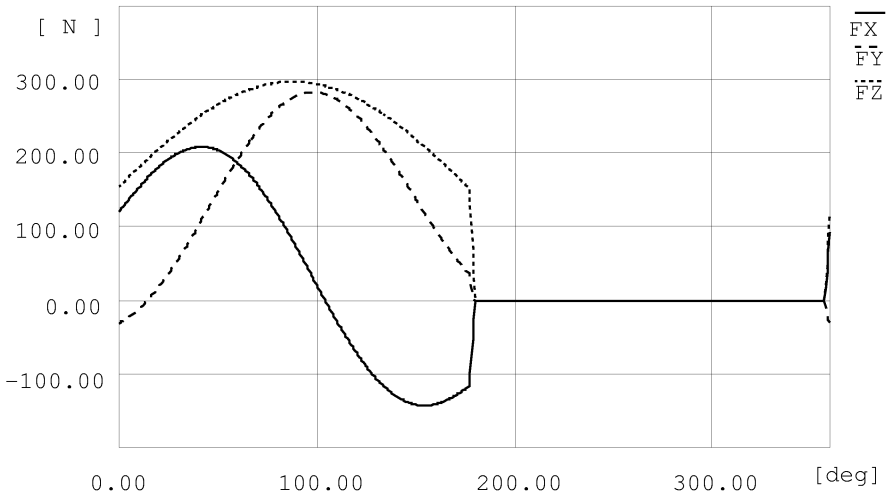


図 4.24 軸方向切り込み $0.5mm$ のときの予測値

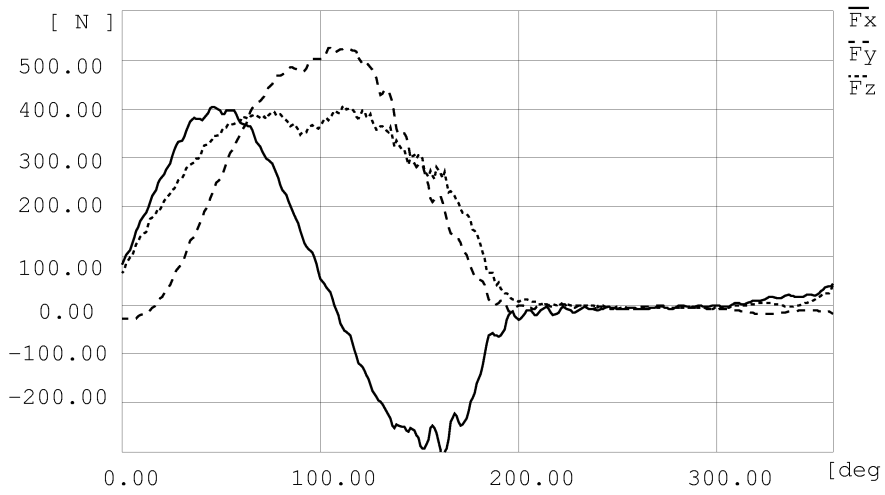


図 4.25 軸方向切り込み 1.0mm のときの計測値

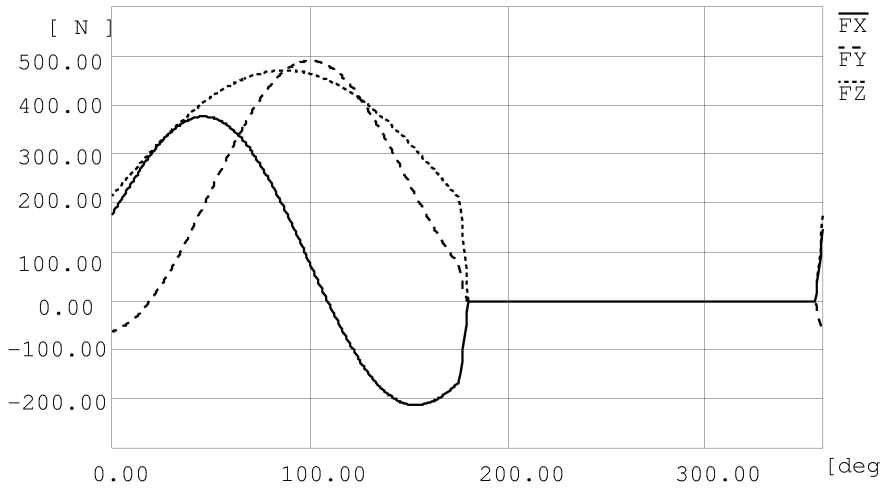


図 4.26 軸方向切り込み 1.0mm のときの予測値

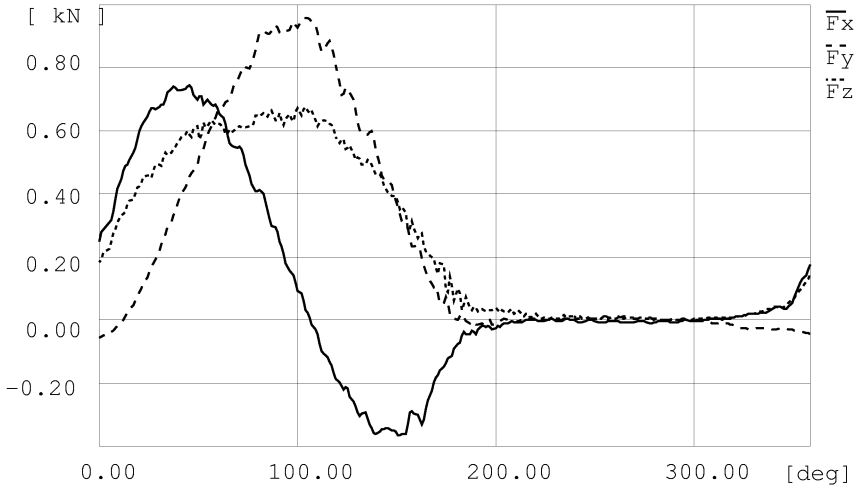


図 4.27 軸方向切り込み 2.0mm のときの計測値

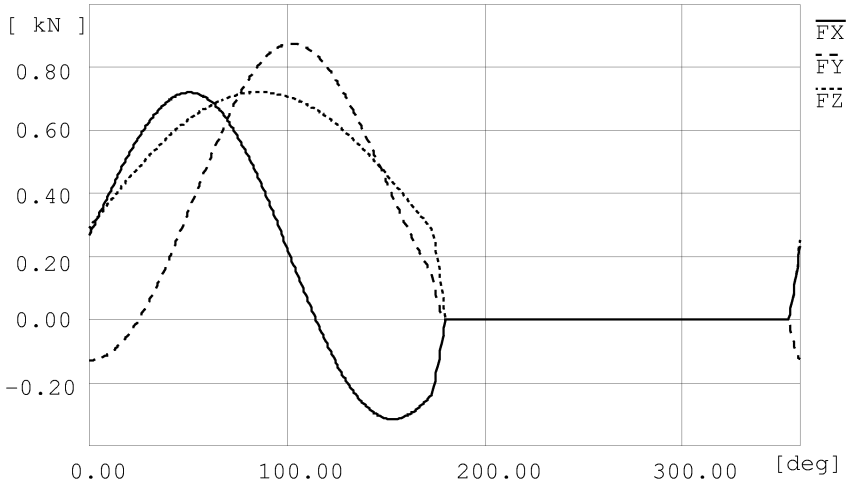


図 4.28 軸方向切り込み 2.0mm のときの予測値

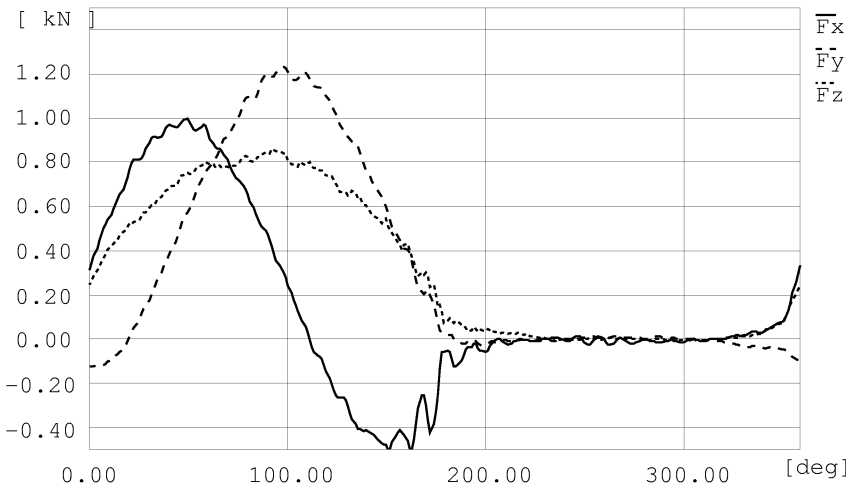


図 4.29 軸方向切り込み 3.0mm のときの計測値

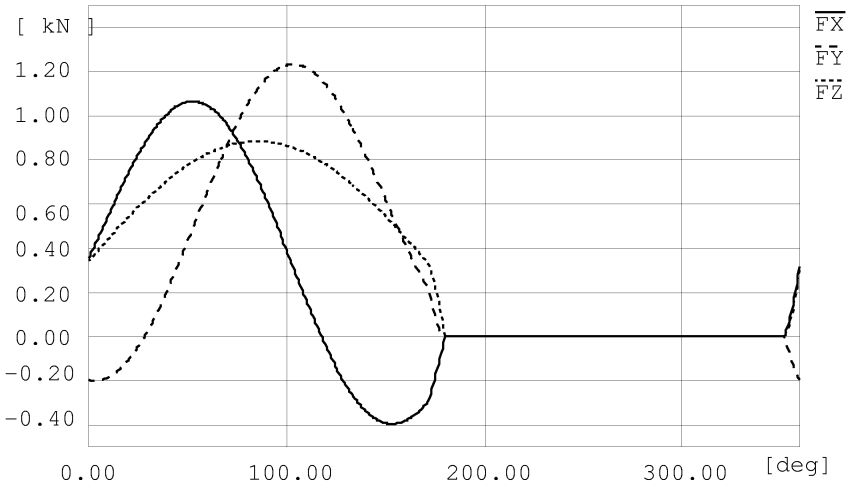


図 4.30 軸方向切り込み 3.0mm のときの予測値

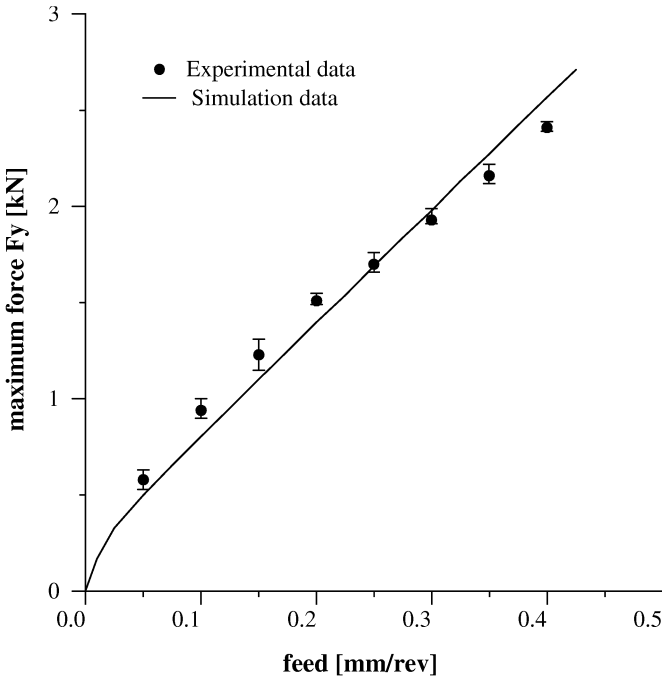


図 4.31 送り量を変化させた時の最大切削力

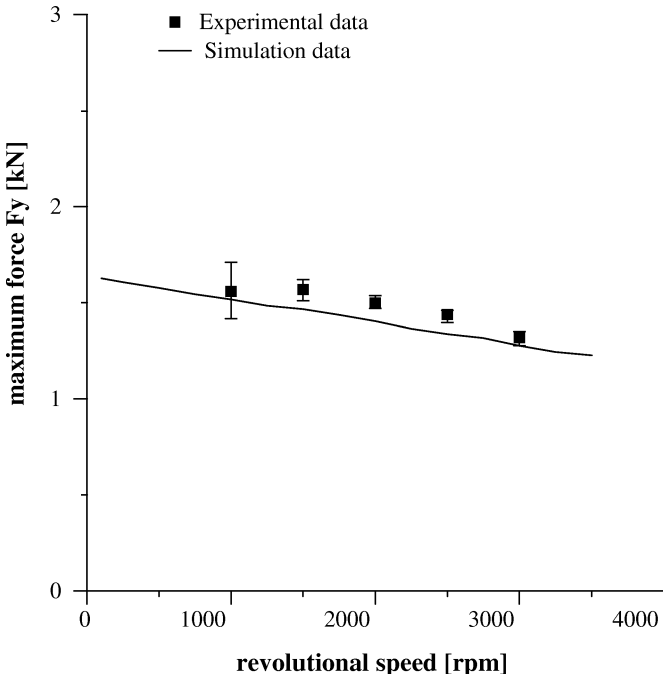


図 4.32 回転速度を変化させた時の最大切削力

予測の結果は，各成分の最大切削力で，15% 以内の予測が可能であった．このことから，パラメータの決定が成功すれば，切削力の予測は可能であると考えられる．

予測値と計測値のずれが最も大きいのは，軸方向切り込み量が $0.5mm$ の時である．この理由として考えられるのは，工具先端近傍での近似誤差の影響が考えられる．すなわち，今回開発したシミュレーションシステムでは，工具の移動を球で近似して実質切り込み量を計算を行った．しかしながら，実際の切れ刃の運動はトロコイド曲線と呼ばれる曲線である．この近似誤差は，切れ刃の回転半径が大きければ無視しても良いが，工具先端近傍での切削のように，回転半径の小さい切れ刃による切削が支配的になる場合には，無視できない量になる．そこで，軸方向切り込みが最も小さい $0.5mm$ の時のずれが最も大きくなったと考えられる．

4.3　加工プロセスモデルの更新

本節では，加工結果に基づくプロセスモデルの更新の方法について述べる．従来の手法では，ここで述べる作業に相当する機能は，事前の予備実験に基づいてモデル化によって達成されてきた．しかしながら，多様な加工対象に対する高精度な加工状態の予測を提示するためには，このような固定的な予備実験を前提とした加工シミュレーションでは十分な効果が期待できない．以下では，まず加工結果からモデル化を行う過程について検討する．

本来，加工時の物理現象の完全な予測を行うためには，送り，切削速度，被削材特性，工具特性など，物理現象に関するあらゆる影響因子を考慮したモデルを作成することが必要である．しかし，加工時の物理現象は，一般に極めて複雑で，理論的に定式化の不可能な現象も多数存在する．さらに，影響がきわめて少ない因子も多数存在する．そこで，実際にはあらゆる因子を考慮したモデル化は行わず，影響の大きい支配的な因子を抽出し，その影響因子のみの関数として，物理現象を近似的に定式化する．このようなモデル化の流れを以下にまとめる．

ある物理現象のあらゆる影響因子を考慮したモデルを $\mathbf{F}(\mathbf{X_1}, \mathbf{X_2})$ とする．ここで，$\mathbf{X_1}, \mathbf{X_2}$ は，それぞれ，定式化が容易な影響因子[1]，定式化が困難な影響因子を表す．ただし，定式化が困難な影響因子とは，影響が不明確なものだけではなく，簡単のため省略された影響因子の非線形項なども含む．この $\mathbf{F}(\mathbf{X_1}, \mathbf{X_2})$ を，必要となる精度，費やすことのできる労力などを考慮して，$\mathbf{X_2}$ の影響を $\mathbf{X_1}$ を用いて近似する．この近似を行う時にパラメータ $\mathbf{K}$ を導入する．即ち，

$$\mathbf{f}(\mathbf{X_1}, \mathbf{K}) \simeq \mathbf{F}(\mathbf{X_1}, \mathbf{X_2}) \tag{4.2}$$

と近似する．この近似を行うのが，モデルの生成過程であると考えられる．従来の研究では，近似関数 $\mathbf{f}(\mathbf{X_1}, \mathbf{K})$ を決定した後，予備実験によってパラメータ $\mathbf{K}$ を求めていた．一方，本研究では加工結果からパラメータ $\mathbf{K}$ を求める．これは，加工の影響因子 $\mathbf{X_1}$ と加工によって得られる出力 $\hat{\mathbf{F}}_i$ $(i = 1, \ldots, N)$ の組が得られた時，ある距離 $\| \ldots \|$ を用いて，

$$\delta = \sum_{i=1}^{N} \|\hat{\mathbf{F}}_i - \mathbf{f}(\mathbf{X_1}, \mathbf{K})\|$$

[1]" 容易" とか" 困難" とは絶対的な意味を持つわけではなく，最終的にモデル化されるかどうかを区別するのみである．

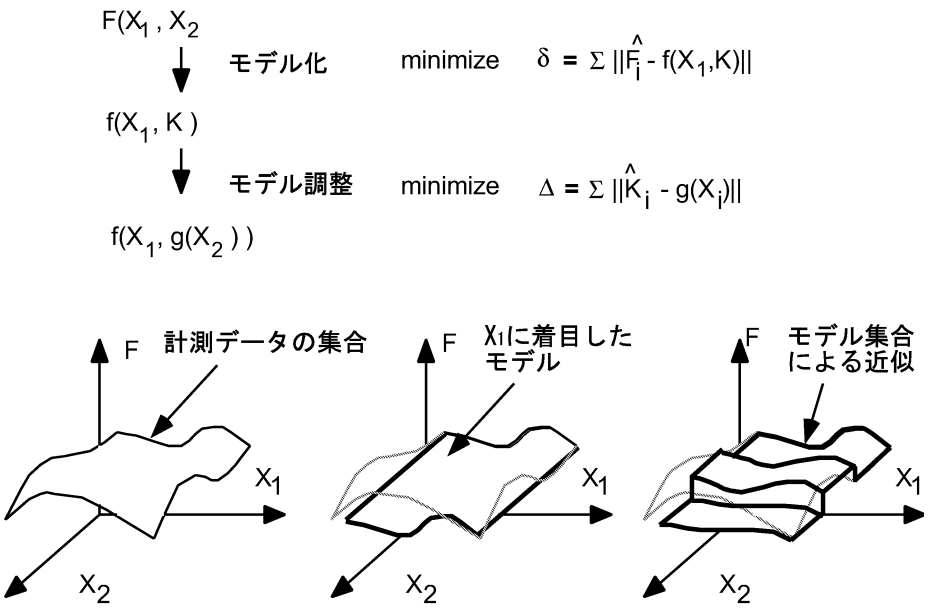


図 4.33 複合型の事例蓄積手法

で定義される残差 δ を最小化することによって求める．すなわち，最適化問題を解くことによって，$\mathbf{K}$ を求める．

ここで，(4.2) 式のような仮定を行って求めた $\mathbf{K}$ が，様々な条件において一定の値となればのモデル化は現象を良く表していることになる．しかし，一般には，$\mathbf{K}$ は一定の値はとらず，$\mathbf{X_2}$ の関数 $\mathbf{K} = \mathbf{g}(\mathbf{X_2})$ となる．いま，出力 $\hat{\mathbf{F}}_i$ から求まったパラメータを $\hat{\mathbf{K}}_i$ とすると，

$$\Delta = \sum_{i=1}^{N} \|\hat{\mathbf{K}}_i - \mathbf{g}(\mathbf{X_2})\|$$

で定義される残差 Δ を最小とする関数 $\mathbf{g}$ を，何らかの方法で近似することによって，近似関数 $\mathbf{f}$ の近似精度は向上する．この近似を行なう過程は，学習アルゴリズムによって実現可能である．

以上のように，最適化手法と学習アルゴリズムを併用することによって，信頼度の高い加工プロセスモデルが得られる．これは，図 4.33 に示すように，連続的な尺度の関数近似と離散的な事例近似を併用することにより，効率的かつ高精度な事例蓄積を目指す手法であると言える．

以下ではまず，4.3.1 節において，数理計画法によるパラメータの同定について述べる．続いて，4.3.2 節において，学習アルゴリズムによるプロセスモデルの更新について述べる．

4.3.1 数理計画法による切削モデルの同定

本節では，加工結果として得られるデータから，最適化法を用いて切削モデルを同定する方法について述べる．ここで，プロセスを記述するモデルとしては，複数のものが考えられるので，近似関数 $\mathbf{f_j}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j})$ は複数個存在すると想定される．本節で扱う問題を，次のように整理する．

入力データベクトル $\mathbf{X}$ と出力データベクトル $\hat{\mathbf{F}}_i$ $(i = 1, \ldots, N)$ の組があり，事前に定義された M 個 $(M \geq 1)$ の関数 $\mathbf{f_j}$ $(\mathbf{j = 1, \ldots, M})$ がそれぞれ未知パラメータ $\mathbf{K_j}$ を含むとする．このとき，ある距離 $\| \ldots \|$ を用いて，

$$\delta = \sum_{i=1}^{N} \|\hat{\mathbf{F}}_i - \mathbf{f_j}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j})\|$$

で定義される残差 δ を最小とする関数 $\mathbf{f_j}$ を選択し，δ が最小となる $\mathbf{K_j}$ を求める．

ここで，” 事前に定義された関数” とは，加工の予測を行うにあたってシステム構築者によって事前に用意された候補を意味する．すなわち，どのような関数を設定するのかといったモデル自体の推定は本研究の対象とはしない．このような場合 δ の最小値は，全ての関数 $\mathbf{f_j}$ について δ を最小とするパラメータ $\mathbf{K_j}$ を求め，その中から収束値 δ の最も小さいものを採用すれば良い．

本研究では距離の定義として，次式で与えられる 2 乗和を用いる．なお，$\mathbf{X}$ は，計測データ $\hat{\mathbf{F}}_i$ に対応する入力である．

$$\delta(\mathbf{K_j}) = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}} \left[\left\{ \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{x,i}} - \mathbf{f_{x,j}}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j}) \right\}^{\mathbf{2}} + \left\{ \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{y,i}} - \mathbf{f_{y,j}}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j}) \right\}^{\mathbf{2}} + \left\{ \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{z,i}} - \mathbf{f_{z,j}}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j}) \right\}^{\mathbf{2}} \right] \quad (4.3)$$

残差 δ としては，他の定義を用いることも可能である[2]．しかしながら，この残差の計算式が微分可能であるかどうかによって適用する最適化手法が変わることになる．

このように定式化された問題に対して，最適化法を用いることを考える．最適化の手法としては，様々な手法が提案されている．本研究で最適化の手法として用いるに当たっては，解析的手法を用いるのは困難であると考えられる．また，近年盛んに研究されているニューラルネットを用いた最適化や GA(Gentic Algorithm) などの手法は信頼性という点で問題があると考え，数理計画法を用いることとする．

本研究で扱う対象は非線形性を有しており，数理計画法の中でも非線形計画法を用いる必要がある．しかし，非線形計画法問題全てに有効な手法は現在までのところ存在せず，目的関数，制約条件の一階微係数等の効果的な計算が可能かどうかなど，対象とする問題の性質に応じて適切なものを選択して用いる必要がある．尾田らは，非線形計画法を無制約最適化法と制約条件つき最適化法を併せて表 4.3 のようにまとめている [尾田 88]．

本研究の対象は無制約最適化であり，表 4.3 の A の中から適切な手法を選ぶ必要がある．2.2.1 節で述べた藤井の研究 [藤井 88] では，最急降下法を用いて同様の計算を行っているが，計算時間が大きくかかると報告されている．

本研究では，最適化の計算を多数行う必要があるので，高速な処理が必要となる．表 4.3 の A に挙げられた手法は，評価関数の微係数の計算可能性によって使用が可能かどうかが決まる．本研究で用いる評価関数は一階の微係数が計算可能であるので，これらの中で一階の微係数の求まる問題に対しては，最も収束の早いといわれている準ニュートン法を用いて最適化を行う．

[2]たとえば，z 方向の予測精度は重要ではなく，x,y 方向の予測精度が重要な時には

$$\delta(\mathbf{K_j}) = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}} \left[\left\{ \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{x,i}} - \mathbf{f_{x,j}}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j}) \right\}^{\mathbf{2}} + \left\{ \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{y,i}} - \mathbf{f_{y,j}}(\mathbf{X}, \mathbf{K_j}) \right\}^{\mathbf{2}} \right]$$

のようにする

表 4.3 非線形計画法の分類と特徴 [尾田 88]

大分類	小分類	手法	特徴
A	一方向探索法	黄金分割法	最小点を囲む範囲を一定比率で縮小
		補間法	最小点近傍で二次あるいは三次近似
	直線探索法	フック・ジェーブズの方法	設計空間の座標軸方向に探索
		共役方向法	関数値のみを用いて作られれ共役方向に探索
	勾配法	最急降下法	目的関数の最大傾斜方向に探索
		共役勾配法	一階微係数で作られる共役方向に探索
	ニュートン法	ニュートン・ラプソン法	目的関数の二階微係数を用いて探索方向を決定
	準ニュートン法	可変計量法	一階微係数から二階微係数の近似行列を作り探索方向を決定
B	変換法	罰金関数法	制約条件を罰金項として修正目的関数を最適化
		乗数法	ラグランジェ関数に罰金項をつけた修正目的関数を最適化
	直接法	逐次線形計画法	目的関数，制約条件を線形近似
		逐次二次計画法	目的関数を二次，制約条件を線形近似
		一般縮小勾配法	シンプレックス法の非線形計画問題への拡張
		許容方向法	制約関数も考慮した勾配法

A:無制約最小適法，B:制約条件付き最小適法

ここで，準ニュートン法について簡単に説明をする [今野 78].

いま，k を収束計算における繰り返し回数をあらわす指標として，$H_k \in R^{n\times n}$ によって定義される降下法の方向ベクトル

$$\mathbf{d^k} = -\mathbf{H_k^t}\nabla^{\mathbf{t}}\mathbf{f}(\mathbf{x^k}) \tag{4.4}$$

において，$\mathbf{H_k} = \mathbf{I}$ とすれば，この降下ベクトルは最急降下法と同じになる．簡便な方法である反面，収束が遅いという問題がある．また，$\mathbf{H_k} = \nabla^{\mathbf{2}}\mathbf{f}(\mathbf{x^k})^{-\mathbf{1}}$ としたものがニュートン法であり，収束は早いが計算にヘッセ行列を必要とするので二階の偏導関数の各要素を計算するのに多大の計算時間を必要とするという問題がある．そこで，(4.4) 式の方向ベクトルを用いて探索を進めながら H_k が f のヘッセ行列を近似するように逐次 H_k を変化させてニュートン法のもつ収束性を得ようとする方法が，準ニュートン法である．

次に，本研究の問題に対する定式化を行う．第 4.2.1 節の，(4.1) 式から求められる予測切削力ベクトル $\mathbf{F}(\mathbf{X},\mathbf{K_j})$ と，実際の加工から計測された切削力ベクトル $\hat{\mathbf{F}}$ を (4.3) 式に代入すると，残差 $\delta(\mathbf{K_j})$ は，$\mathbf{X}$ を入力条件，$\mathbf{K_j}$ を切削力モデルのパラメータとして，次式のように表せる．

$$\delta(\mathbf{K_j}) = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}} \left\{ \left\{\hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{x,i}} - \mathbf{F_x}(\mathbf{X},\mathbf{K_j})\right\}^{\mathbf{2}} + \left\{\hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{y,i}} - \mathbf{F_y}(\mathbf{X},\mathbf{K_j})\right\}^{\mathbf{2}} + \left\{\hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{z,i}} - \mathbf{F_z}(\mathbf{X},\mathbf{K_j})\right\}^{\mathbf{2}} \right\}$$

上式で与えられる残差 δ を最小にする $\mathbf{K_j}$ を求めることが目的である．準ニュートン法には，幾つかの公式が提案されている．ここでは，BFGS 公式を用いるとする．Wolf の直線探索のアル

ゴリズムを M_W とすると，準ニュートン法の具体的なアルゴリズムは，次のように表される [今野 78].

step 1 $\mathbf{K_j}^0$，$\mathbf{H_0} = \mathbf{I}$，$k = 0$ とする.

step 2 $\nabla\delta(\mathbf{K_j}^k) = 0$ ならばストップ．ここで，$\nabla\delta(\mathbf{K_j}^k)$ は，$\delta(\mathbf{K_j}^k)$ の $\mathbf{K_j}^k$ に関する勾配である.

step 3 $\mathbf{d^k} = -\mathbf{H_k}\nabla^{\mathbf{t}}\delta(\mathbf{K_j}^{\mathbf{k}})$ によって方向ベクトルを求める.

step 4 $\nabla\delta(\mathbf{K_j}^k)\mathbf{d^k} \geq \mathbf{0}$ ならば $H_k = H_0$ とおいて **step3** に行く.

step 5 $\mathbf{K_j}^{n+1} = \mathbf{K_j}^n + \alpha^k\mathbf{d^k} \in \mathbf{M_W}(\mathbf{K_j}^{\mathbf{k}}, \mathbf{d^k})$ で次のステップの $\mathbf{K_j}$ を求める.

step 6 $\beta^{\mathbf{k}} = \mathbf{K_j}^{\mathbf{k+1}} - \mathbf{K_j}^{\mathbf{k}}$, $\gamma^{\mathbf{k}} = \nabla^{\mathbf{t}}\delta(\mathbf{K_j}^{\mathbf{k+1}}) - \nabla^{\mathbf{t}}\delta(\mathbf{K_j}^{\mathbf{k}})$ として，

$$\mathbf{H_{k+1}} = \left\{\mathbf{I} - \frac{\beta^{\mathbf{k}}(\gamma^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}}{(\beta^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}\gamma^{\mathbf{k}}}\right\}\mathbf{H_k}\left\{\mathbf{I} - \frac{\gamma^{\mathbf{k}}(\beta^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}}{(\beta^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}\gamma^{\mathbf{k}}}\right\} + \frac{\beta^{\mathbf{k}}(\beta^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}}{(\beta^{\mathbf{k}})^{\mathbf{t}}\gamma^{\mathbf{k}}}$$

とおく.

step 7 $k = k + 1$ として **step 2** に行く.

このアルゴリズムに従って，加工結果からプロセスモデルパラメータを決定する.

4.3.2　加工プロセスモデルの学習

本節では，第 4.3.1 節で述べた方法によって同定されたプロセスモデルを，学習アルゴリズムによって高精度化する方法について述べる．まず，本研究での学習過程の特徴を述べるとともに，どのような機能が学習アルゴリズムに要求されるかを述べる．次に，本研究で採用した学習アルゴリズムについて述べる.

本節で扱う問題は，前節と同様に次のように表される.

> 入力データベクトル $\mathbf{X}$ とパラメータベクトル $\mathbf{K}\hat{(\mathbf{j})}_{\mathbf{i}}$ $(i = 1, \ldots, N, j =, \ldots, M)$ の組があり，未知関数 $\mathbf{g_j}$ $(\mathbf{j} = \mathbf{1}, \ldots, \mathbf{M})$ がある．ここで，$\mathbf{K}\hat{(\mathbf{j})}_{\mathbf{i}}$ は関数 $\mathbf{f_j}$ のパラメータであることを示し，添字 i は，全体のデータ数を表す．このとき，ある距離 $\|\ldots\|$ を用いて，
>
> $$\Delta = \sum_{i=1}^{N} \|\mathbf{K}\hat{(\mathbf{j})}_i - \mathbf{g_j}(\mathbf{X})\|$$
>
> で定義される残差 Δ を最小とする関数 $\mathbf{g_j}$ を求める.

第 4.3.1 節の問題と異なるのは，対象とする関数 $\mathbf{g_j}$ が未知関数である点である．このような問題に対しては，事前に数理モデルを規定しなければならない数理計画法を使用するのは困難である．未知関数の同定方法としては，回帰分析，GDMH，ニューラルネットワーク (NN)，事例学習，暗記学習などが代表的な手法である．ここでは，これらの手法を教示入力の蓄積の方法により，1) 事例を抽象化して記憶する方法，2) 事例をそのまま記憶する方法，に分類する.

前者は，各教示入力の蓄積を行う時に規則を用いる方法といえる．また，後者は，蓄積された教示入力の抽出を行う時に規則を用いる方法と言える．

本節で扱う問題の特徴を挙げると，次の 2 点であると考えられる．

1. 多数の経験則・ノウハウなどから，$\mathbf{g_j}$ に関して断片的に多数の候補が存在する．
2. パラメータはノイズを含むデータから計算されるので不確定性を有する．

これらの特徴から，本研究で用いる学習アルゴリズムは，A) 入力情報として多数の候補を効率良く処理する機能，B) 不確定性を有するデータからでも安定して解を求める機能，を有することが必要となる．

ここで，A) の機能は，事前に考え得るあらゆる入力情報を想定して，学習を行なえば実現は可能である．しかしながら，このような方法は計算量・記憶容量の点から考えても現実的ではない．そこで，影響あると考えられる因子を事前にある程度規定しておき，学習を行いながら入力とする影響因子を逐次変化させる方法が有効であると考えられる[3]．そこで，最初ある変数を影響因子として仮定して学習を行い，途中から別の影響因子を変数として学習を行う時，過去に得た計測結果を利用するために必要な作業について検討する．

事例の抽象化を行う方法では，モデル化の方法の変化は，抽象化の方法の変化として現れる．すると，過去に蓄積された事例を用いるためには，抽象化の方法相互間の変換規則を求める必要がある．これには多大の計算労力が必要であると考えられる．一方，事例をそのまま記憶する方法では，モデル化の方法の変化は事例の抽出方法の変化として現れる．この場合，事例の蓄積に関して変更する必要はない．

この点で，事例を記憶する方法は有効であると言える．しかし，B) のノイズの問題に対しては抽象化を行って記憶する方法の方が安定である．そこで，両者を比較するために，抽象化を行う方法，事例と規則の両方を用いる方法，事例をそのまま記憶する方法の例として，ニューラルネット，事例学習，暗記学習を取り上げ，それぞれの方法を比較する．

図 4.34 にニューラルネット，事例学習，暗記学習の記憶の方法の概念図を示す．図 4.34(a) に示すニューラルネットでは，データを記憶に反映するとき，既存のデータ群を近似する非線形関数を変化させることによって，記憶を行う．一方，図 4.34(c) に示す暗記学習では，データをそのまま記憶する．そして，記憶を抽出するときに，蓄えられたデータと与えられた入力の類似を計算し，過去の最も類似した事例の出力を用いて学習システムの出力を行う．また，図 4.34(b) に示す事例学習は，これらの中間的な手法で，事例によって代表される領域を補間する規則を有する．

通常多く用いられる逆誤差伝搬法を用いた多層型のニューラルネットワークの長所としては，汎用的な手法であること，非線形の近似が可能なことが挙げられる．一方，短所としては，ネットワークの学習と利用を分離するので学習の終了条件の判定の明確な判断基準が必要となることが挙げられる．

暗記学習は，教示入力の入力変数によって張られる超空間をボロノイ分割していると考えられる．ニューラルネットで中間層を増加させることに相当する表現精度の向上の機能は記憶する事例の数を増やすことによって実現できる．長所としてはこの他に，安定に計算が行えるこ

[3]最初は温度と工具進行方向を影響因子として学習を行い，その収束状況に応じて工作機械の振動も影響因子に加える．

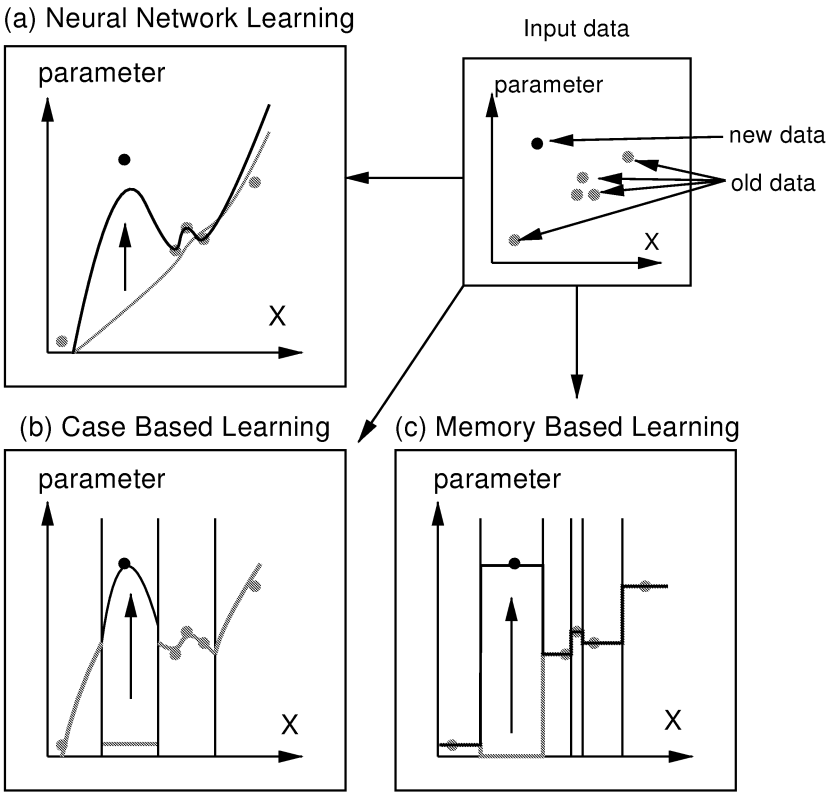


図 4.34 記憶方法の比較

とが挙げられる．一方，短所としては各事例をそのまま用いるため，ノイズの影響を受け易い点と，記憶容量が膨大になることが挙げられる．しかし，近年の情報処理機器の高性能化に伴って，実用的なレベルでの大規模情報処理が可能となってきていることから，計算速度などの問題は今後減少すると予想される．また，将来的にデータマイニング手法などの導入も視野に入れた場合，データの収集時に恣意的な抽象化を行うことは不適当であると考えられる．

また，ボロノイ分割を，教示入力がある限り無限に繰り返していくのが暗記学習であり，ボロノイ分割の大きさを制限し，分割空間の中では規則を用いて記録されたデータを補間するのが事例学習であると考えられる．事例学習を行うためには，分割空間を導出するためのルールの設定（事例の記述）が必要となるが，常に恣意性を含んだ設定となるため，この設定の妥当性が学習機能に大きく影響することになる．

モデルの変更の容易さから，事例学習が本研究には有効であると考えられる．そこで，本研究では，事例学習の簡単な例として，暗記学習 [畝見 92] を基にした学習アルゴリズムを用いる．

また，入力間の類似の計算は，各成分を正規化した後ユークリッドノルムを採ることによって計算する．基本的な処理の流れを示す．

step 1 シミュレーションを行う加工条件 X_{new} を取得する．

step 2 記憶されたデータの中で，最も類似した加工条件 X_{old} を求める．

step 3 X_{old} に対応するモデルとモデルパラメータ K_{old} を求める．

step 4 K_{old} を用いて加工シミュレーションを行う.

step 5 加工を行い，加工結果から求まる K_{new} を記録する.

なお，入力間の類似度は，以後，シミュレーション結果を用いて何らかの意思決定を行う際に，モデルの信頼性を反映する関数として利用できる.

4.3.3 切削力試験 (傾斜平面の加工)

これまで説明してきたモデル学習の効果を検証するために，本研究で提案した加工結果からのモデルの切削力の予測能力の比較を行った.

ここでは，図 4.35 に示す傾斜面を切削する場合について，軸方向切り込み $1mm$，回転数 $2000rpm$ で，表 4.4 に示したように送り量と傾斜角度を変えて実験を行った．使用工具としては，$\phi 16$ の 1 枚刃超硬ボールエンドミルを用い，被削材は，構造用炭素鋼 S50C(HRB 約 95) を用いた．この時の切削力の予測値と計測値の比較を図 4.36 から図 4.55 に示す．ここでは，従来の手法に基づくモデルと，本研究の提案する方法で決定されるモデルの比較を行う．表 4.4 における，モデルの欄の意味は，モデルを構築する際に用いた加工結果の実験番号である．これは，本手法では加工結果からモデルを決定するので学習の対象によってその精度も異なるので，どのモデルを用いて学習を行ったかを区別する必要があるからである．ここで，モデル 1 とは実験番号 1 のデータから学習されたモデルを指す.

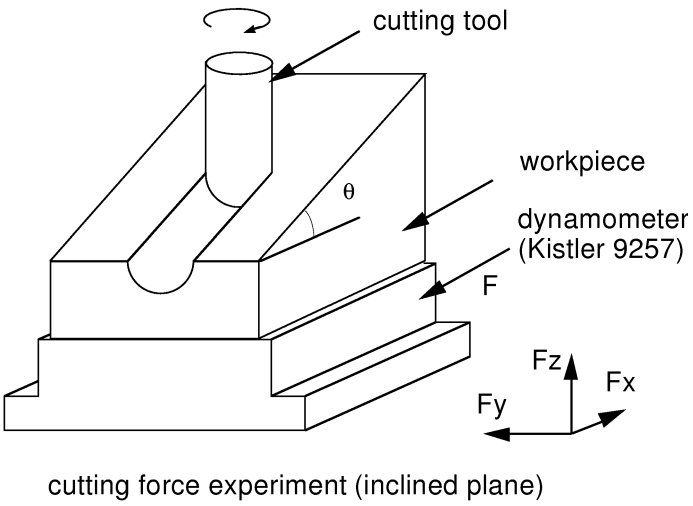


図 4.35 評価実験

表 4.4 傾斜面切削実験の加工条件

実験番号	送り量 [mm/rev]	傾斜角度 [度]	モデル
1	0.1	+10	3 , 5
2	0.1	−10	4 , 6
3	0.3	+10	1
4	0.3	−10	2
5	0.1	+20	1
6	0.1	−20	2

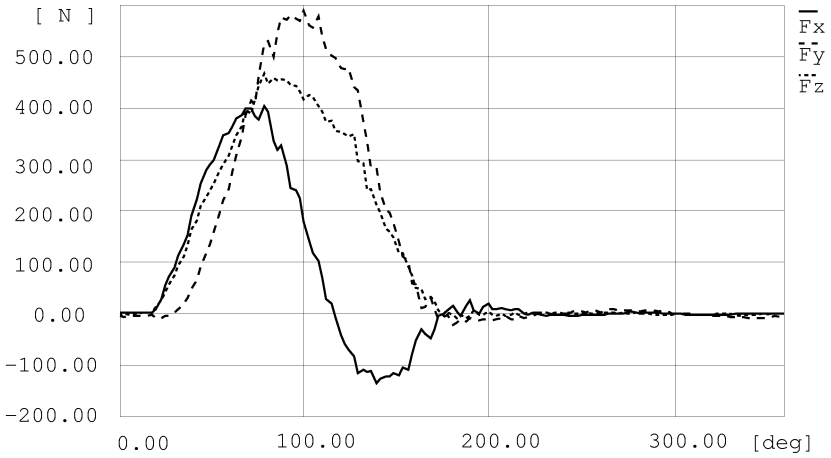


図 4.36 実験番号 1 の計測値

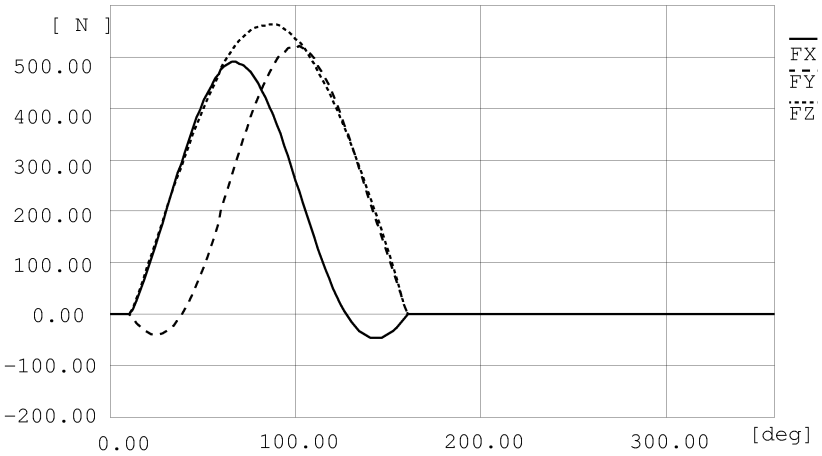


図 4.37 実験番号 1 のモデル 3 による予測値

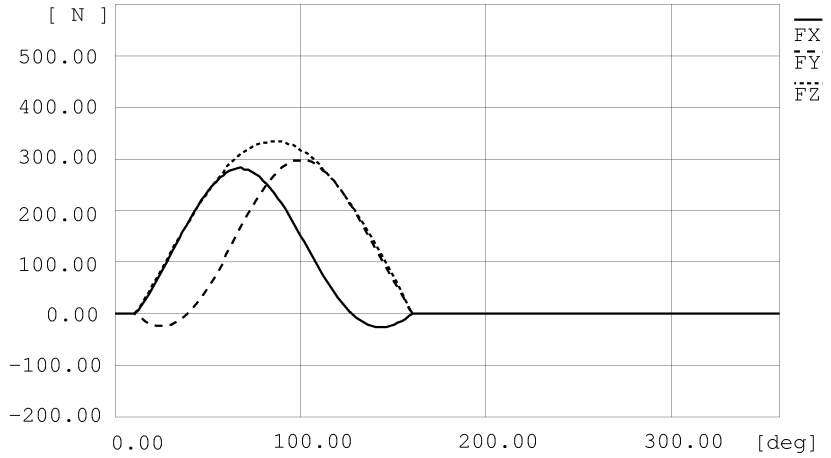


図 4.38 実験番号 1 のモデル 5 による予測値

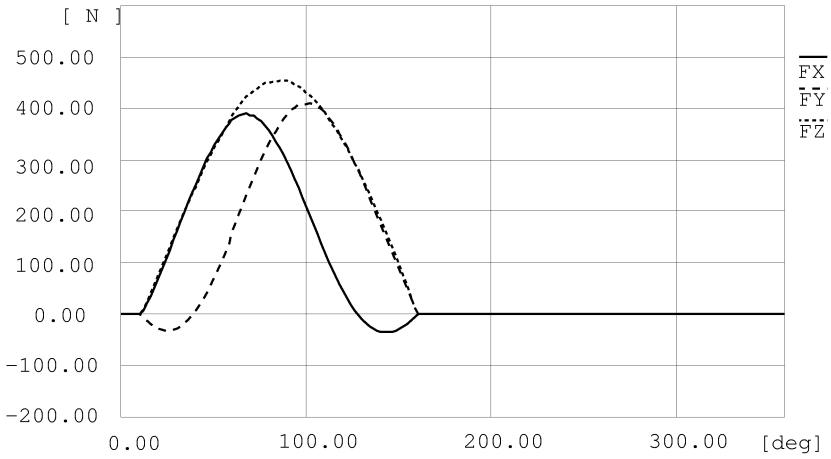


図 4.39 実験番号 1 の従来モデルによる予測値

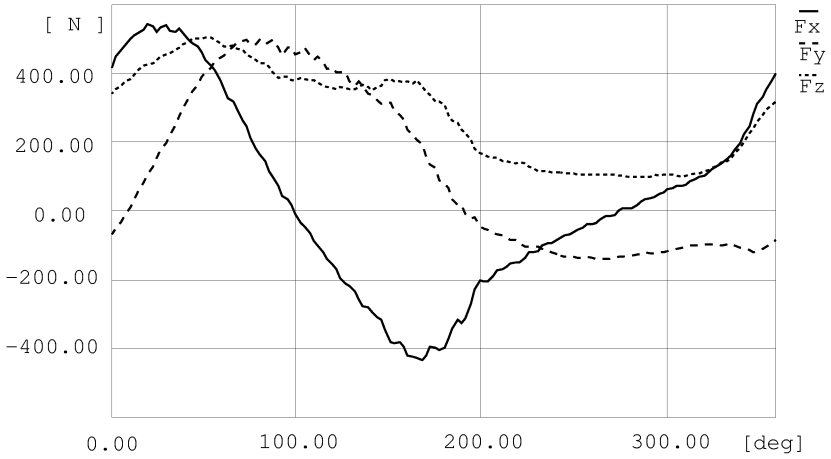


図 4.40 実験番号 2 の計測値

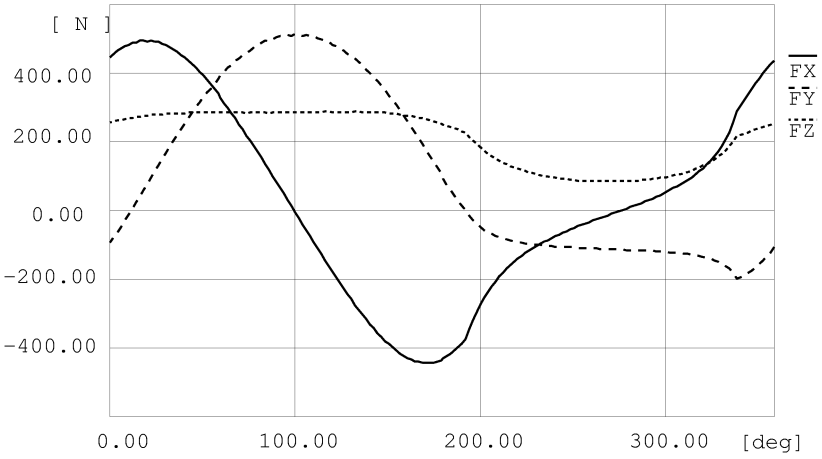


図 4.41 実験番号 2 のモデル 4 による予測値

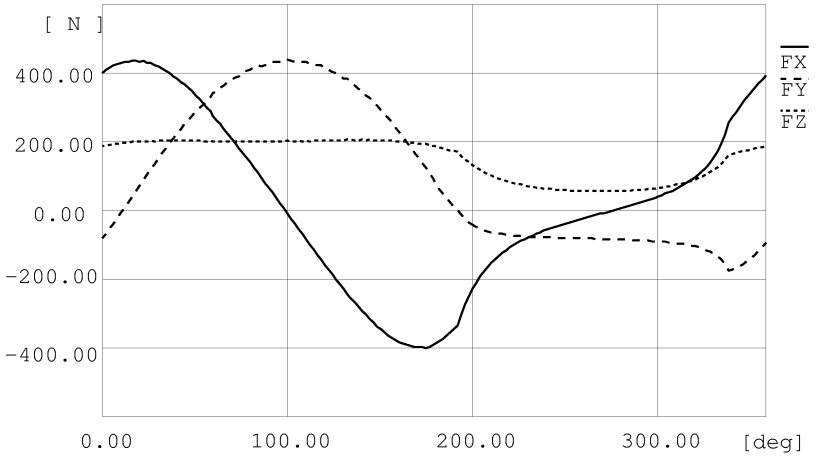


図 4.42 実験番号 2 のモデル 6 による予測値

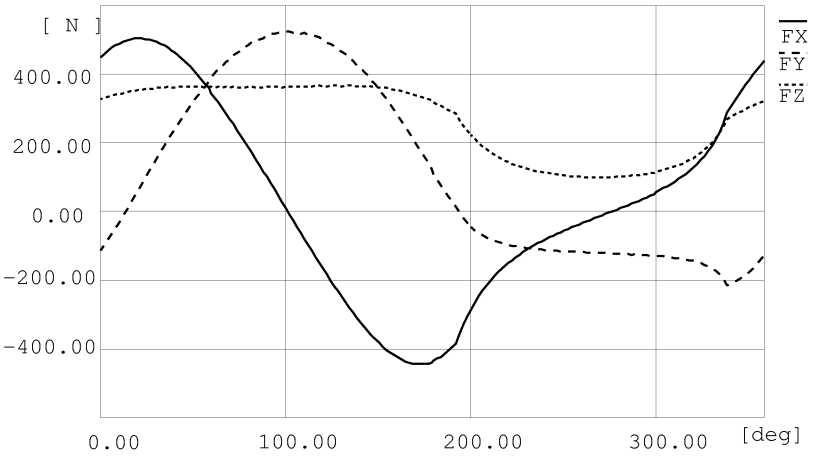


図 4.43 実験番号 2 の従来モデルによる予測値

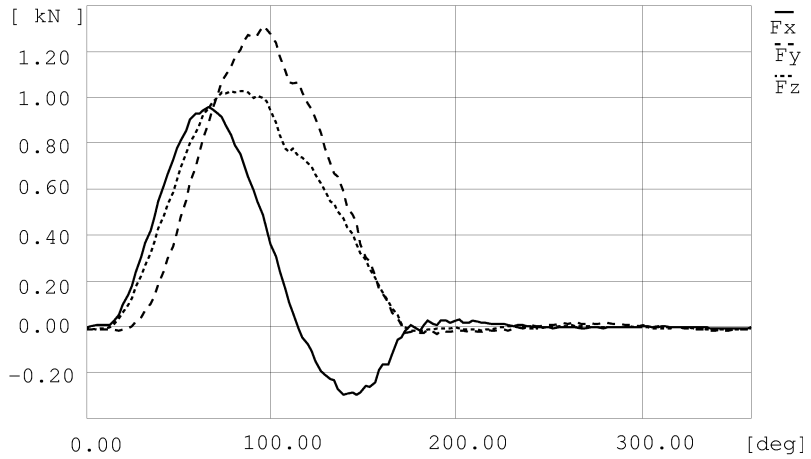


図 4.44 実験番号 3 の計測値

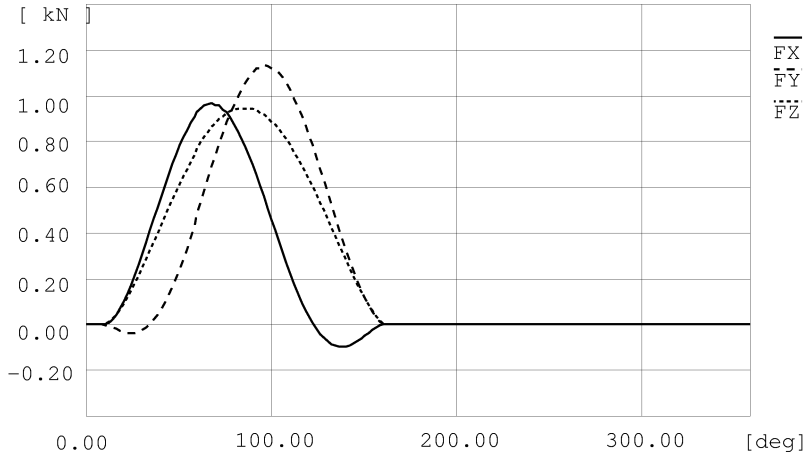


図 4.45 実験番号 3 のモデル 1 による予測値

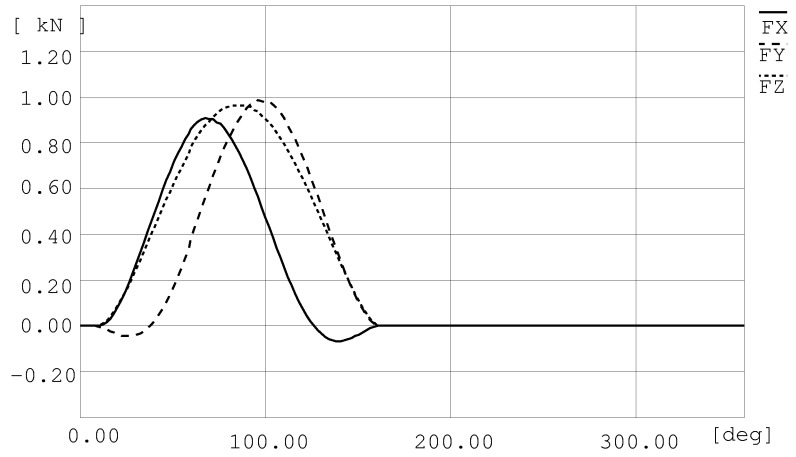


図 4.46 実験番号 3 の従来モデルによる予測値

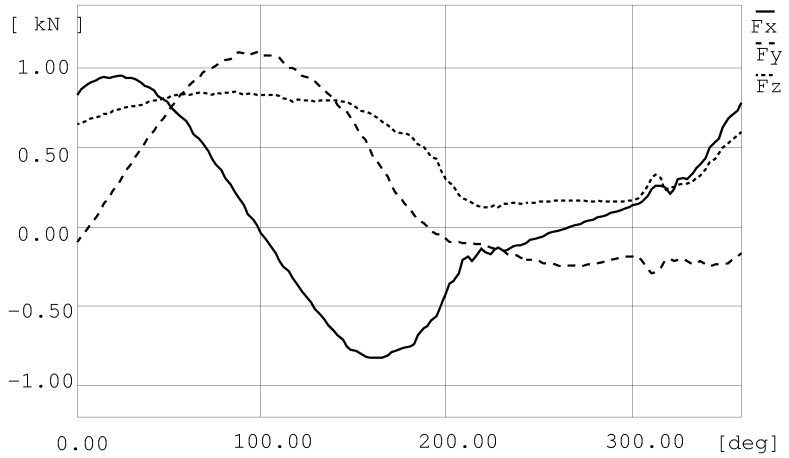


図 4.47 実験番号 4 の計測値

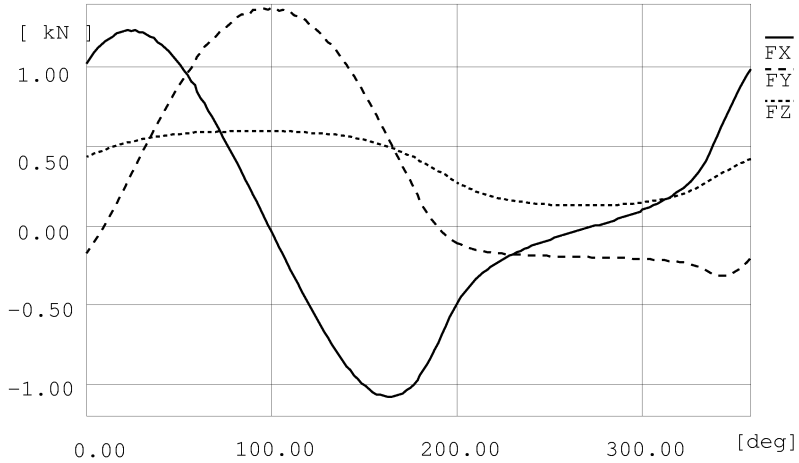


図 4.48 実験番号 4 のモデル 2 による予測値

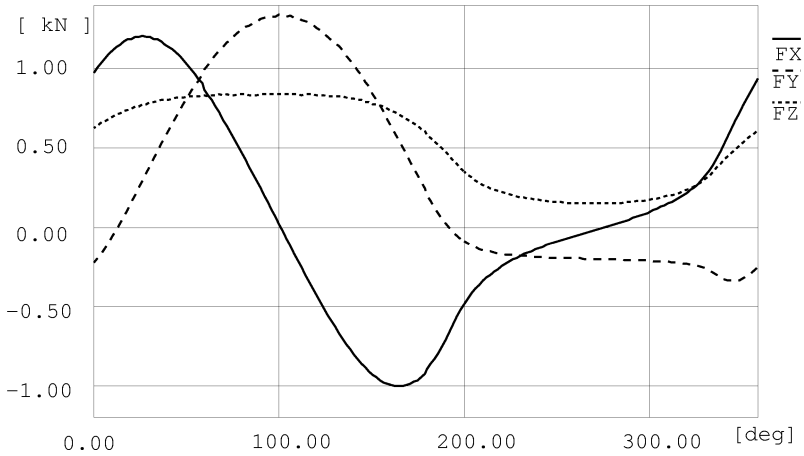


図 4.49 実験番号 4 の従来モデルによる予測値

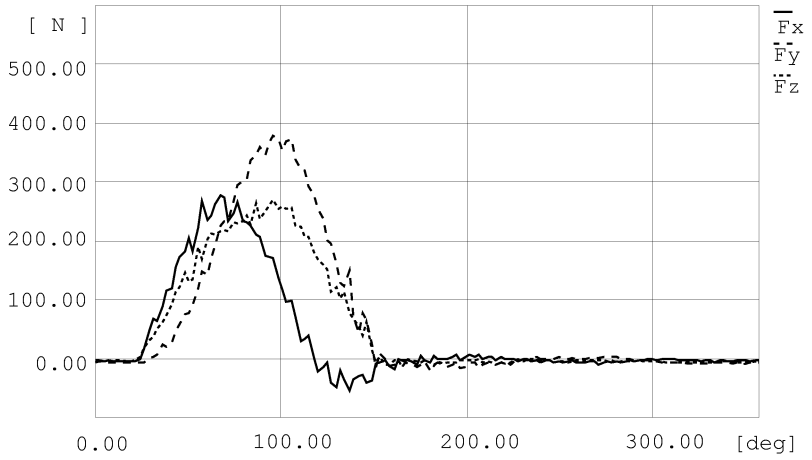


図 4.50 実験番号 5 の計測値

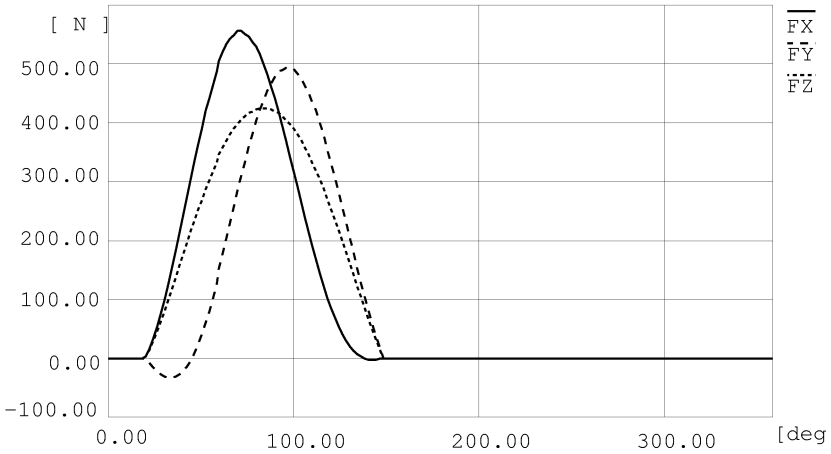


図 4.51 実験番号 5 のモデル 1 による予測値

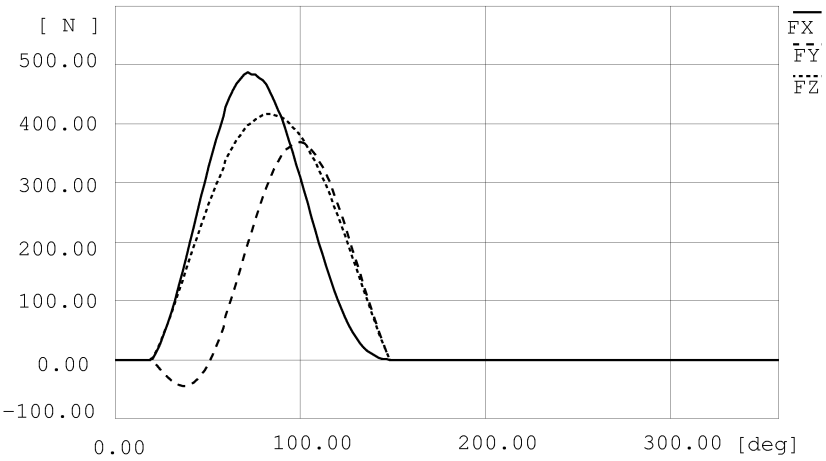


図 4.52 実験番号 5 の従来モデルによる予測値

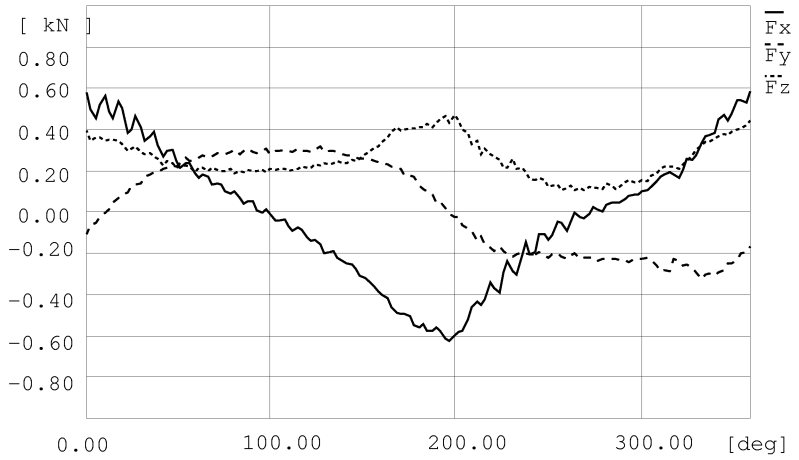


図 4.53 実験番号 6 の計測値

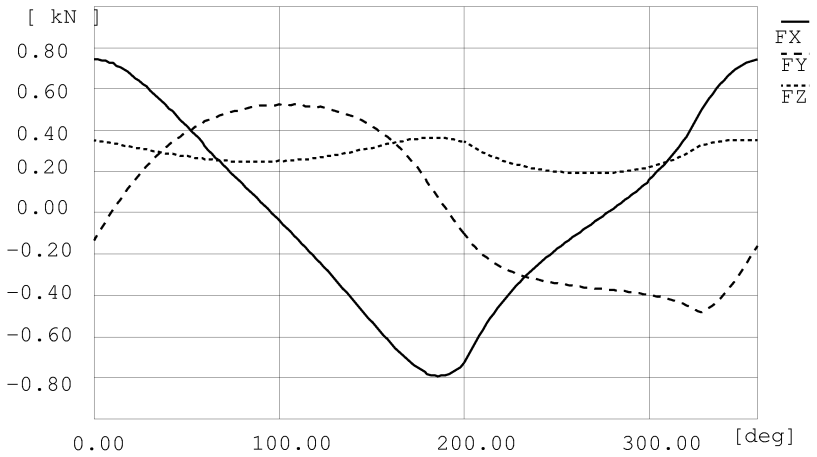


図 4.54 実験番号 6 のモデル 2 による予測値

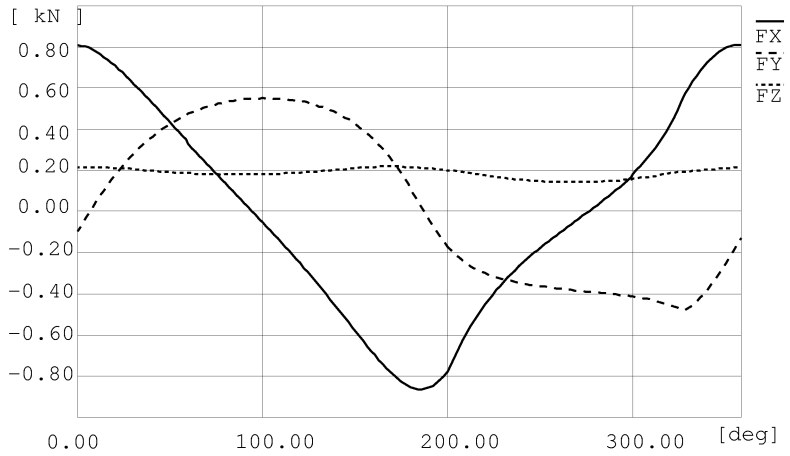


図 4.55 実験番号 6 の従来モデルによる予測値

実験結果を見ると，良好な切削力推定を行うためには，類似した角度の結果から推定されたパラメータを用いることが不可欠であることが分かる．このことは，従来のように固定的にモデルを使用する枠組みでは，適切な切削力推定が行えないことを示している．一方，本研究で提案するシミュレーションの枠組みでは，類似した加工条件で推定されたモデルを用いることで，良好な推定が期待できる．さらに，獲得されたモデルが使用状況と異なっている場合においても，事例の類似度やモデル推定の確からしさを基に，予測結果の信頼度を評価することが可能であるため，適切な意思決定を行うことにより誤った予測によるトラブルを回避することができると考えられる．

4.4　本章のまとめ

本章では，作業者に対する加工情報の事前評価を支援するための加工シミュレーションについて述べた．加工の準備段階における予測情報の提示は，加工に対する一般的知識を反映したものであることから，作業者が自己の経験をより効率的に理解することも期待される．

まず，加工プロセスの表現として，多相性を考慮した加工プロセス表現を提案した．提案した表現は断片的な加工予測結果の間での関連付けを目的とした表現である．そして，従来研究されることが少なかったボールエンドミル加工における切削力予測について示した．特に，工作物と工具の干渉判定を意図した高精度な形状評価を行うために P-map 法を基にした加工シミュレーションを開発した．さらに，モデルやパラメータの同定仮定を含めたモデルの利用により，高精度で信頼性の評価も伴った切削力予測が可能となることを示した．

本章で示した手法により，多様な作業状況に対して信頼度の高い加工シミュレーションが行えることが可能となり，作業者に対する事前予測の提示や，一貫した作業設計における整合性維持のための基本情報の生成が可能となると考えられる．

参考文献

[臼井 90] 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 , (1990)

[中山 78] 中山 一雄, ” 切削加工論 ”, コロナ社, (1978)

[竹山 80] 竹山 秀彦, ” 切削加工 ”, 丸善株式会社, (1980)

[Takata 89] Takata, S. , Tsai, M.D., Inui, M., Sata, T., ”A Cutting Simulation System for Machinability using a Workpiece Model”, Ann. CIRP, Vol.39, No.1, 417(1989)

[帯川 93] 帯川利之, 重川英文, 笹原弘之, 白樫高洋 ” マシニングセンタの加工精度予測と精度補償システム ” 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.653-654(1993)

[Takata 93a] Takata, S., ”Generation of a Machining Scenario and Its Applications to Intelligent Machining Operations”, Annals of the CIRP, Vol.42, No.1,pp.531-534(1993).

[Onosato 93] Onosato, M. and Iwata, K., ”Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models”, 1993 Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 475-478(1993)

[蔡 91] 蔡 明達, ” 切削プロセスモデルに基づく加工シミュレーションとＮＣプログラミング ”, 東京大学博士論文, (1991)

[藤井 86] 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, No.2, pp.273-278 (1986)

[Yang 91] Yang, M., and Park, H., ”The Prediction of Cutting Force in Ball-end Milling”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.31, No.1, pp.45-53(1991)

[高崎 87] 高崎 昭, 阿部 忠之, 神田 敬一, 松岡 和彦, 渡辺 一樹, ” 高速型彫り技術の開発 第 1 報 —ボールエンドミルにおける切削メカニズムの解析— ”, トヨタ技術, Vol.37, No.2, pp.221-226(1987)

[白瀬 86] 白瀬 敬一, 稲村 豊四郎, 安井 武司, ” エンドミル加工における加工誤差の要因分析と定量化 ”, 精密工学会誌, Vol.52, No.4, pp.705-710 (1986)

[藤尾 00] 藤尾三紀夫, 柳下福蔵, 鈴木　裕, ”Boundary - Map データ構造に基づく CAD/CAM システムの開発 ”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1048-1053(2000)

[Kaneko 02] Kaneko, J., Teramoto, K., and Onosato, M., ”An implicit shape representation method for sequence-free force estimation in end-milling”, Proc. of ICMT2002, pp.260-265(2002)

[Wang 87] Wang, W., ”Application of Solid Modeling to Automate Machining Parameters for Complex Parts”, 19th CIRP International Seminar On Manufacturing Systems, Vol.33,(1987)

[山崎 92] 山崎 好幸, “モデルベースド・インテリジェント加工ステーション”, 大阪大学修士論文, (1992)

[川島 90] 川島 泰正, 伊藤 久美子, 石田 智利, 野中 士郎, 江尻 一彦, ” NC 加工シミュレータの開発—システム構成法— ”, 精密工学会誌, Vol.56, No.5, pp.891-896 (1990)

[Takeuchi 89] Takeuchi, Y. ,Sakamoto, M., ”Devolopment of a Personal CAD / COM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques”, Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, pp.429-432 (1989)

[岸浪 89] 岸浪 健史，金井 理，新庄 博之，中原 博史，斎藤 勝政 ” Voxel 表現法の機械加工シミュレータへの応用 ”，精密工学会誌， Vol.55， No.1，pp.105-110 (1989)

[呂 90] 呂 恒正，三好 隆志，斎藤 勝政，”P-map 形状モデリング方式による CAD/CAM システムに関する研究—P-map の概念及び特性—”，精密工学会誌，Vol. 56， No.8， pp.1411-1416 (1990)

[Saito 91] Saito, T., and Takahashi, T., ”NC Machining with G-buffer Method”, Computar Graphics, Vol.25, No.4 July, pp.207-212 (1991)

[藤井 88] 藤井 義也，寺井 丈浩，” ボールエンドミルシミュレータに関する研究—切削抵抗解析— ”，精密工学会誌， Vol.54， No.12， pp.2301-2306 (1988)

[尾田 88] 尾田 十八，山崎 光悦，” 機械構造設計の最適化手法とその応用 (4)—非線形計画法とその応用— ”，機械の研究，Vol.40，No.8，pp.935-940(1988)

[今野 78] 今野 浩，山下 浩，” 非線形計画法 ”，日科技連，(1978)

[畝見 92] 畝見 達夫，” 実例に基づく強化学習法”，人工知能学会誌，Vol.7，No.4，pp.697(1992)

第5章　Sensor Configured Simulation を用いた加工状態の可視化

本章では，加工中に作業者に加工状態を提示する手法について述べる．これは，作業者が加工プロセスの進行を安全かつ効果的に観察することにより対象プロセスに対する理解を深めることを目的としている．まず，加工状態提示の枠組について概説する．続いて，センサからの計測情報とシミュレーションを併用した状態推定の枠組について述べる．さらに，加工状態提示の例として工作物温度場の推定と可視化について示す.

5.1　加工状態提示の枠組

切削加工時には，第 4.1.1 節の表 4.1 に示したように様々な物理現象が発生し，それらが部品の精度や作業能率に大きく影響する．しかしながら，これらの現象の多くは直接観察することが困難なものであり，熟練技能者は切削音や切屑の色といった間接的な情報から加工状態を推定してきた．多くの熟練技能に関する研究から，このような加工中における加工状態の認識は高度な加工には不可欠な能力であると考えられている．しかしながら，第 3 章でも述べたように，作業者の安全を確保するために加工プロセスの密閉化が進んでいることから，現在の作業者がこのような状態推定技能を獲得することは困難となってきている．また，小ロットでの高精度加工を実現するためには，適宜新たな加工状態に適応できるように作業者の状態認識を効率的に支援することが不可欠である．そこで，本研究では，作業者に加工状態を可視化して提示することにより，体験的知識の獲得を効果的に行うことを提案する．このような状態提示機能により，作業者の経験に基づく加工条件の設定や加工途中での調整といった作業者の介入が可能となると考えられる.

エンドミル加工における状態推定において，求められる機能を整理すると，以下の 3 点に集約される.

- 加工対象全域に対する大域的な状態推定機能.
- 加工プロセスに影響しない計測機器配置.
- 個別の事例ごとのばらつきを反映した検出.

加工中の加工状態を認識するための研究としては，実際の加工時における計測を重視するものと，物理モデルを基にしたシミュレーションを重視するものに分類できる．前者は，主に加工の自動監視を目的とした研究で行われてきたものであり，後者は，加工の事前評価を目的として研究されてきた．計測にもとづく状態推定は信頼性の高い情報を得ることが可能である．しかしながら，計測可能な領域が限定されているため，物理現象の大域的な情報の把握が困難であるという問題点がある．一方，物理モデルを基にした加工シミュレーションは，対象全域にわたる状態推定が可能である反面，個々の作業における加工状況のばらつきを考慮することは困難であり，情報の信頼性には問題がある.

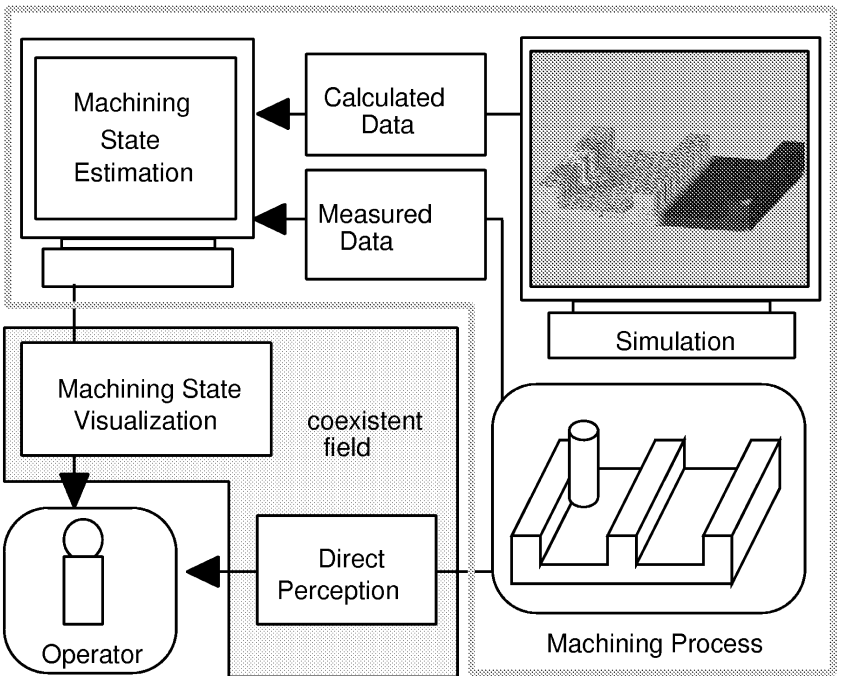


図 5.1 加工状態可視化システムの概要

そこで，本研究では，図 5.1 に示すようなシミュレーションと計測情報を併用する手法について検討する．これは，概略的な状態の推定は加工シミュレーションを基に行い，断片的な計測データを用いて個々の作業における個別状況への推定結果の調整を行うというものである．本手法により，信頼性の高い情報を工作物全域にわたって獲得することが可能となり，作業者に対して適切な状態提示が行えると考えられる．そして，このような枠組を実現するために必要となる要素技術としては，以下のものが挙げられる．

センシング 治具・取付具へのセンサの埋め込みや非接触センサの利用により，多様な情報を加工を妨げることなく獲得するための技術.

シミュレーション シミュレーション処理のリアルタイム性を考慮しつつ，多様な物理現象を推定する技術.

状態推定 状態推定のリアルタイム性を考慮しつつ，信頼性の高い状態推定を行う技術.

状態提示 実世界情報と計算機によって求められた情報の適切な提示に関する技術.

センシングおよびシミュレーションについては，第 2 章で見たように数多くの研究がなされている．また，状態提示に関しても，拡張現実感技術 [大山 94] [Kimura 98] に代表される様々な研究がなされている．そこで，以下では，状態推定に対象を限定して検討を行う．

5.2 Sensor Configured Simulation による加工状態推定の枠組み

加工プロセスのシミュレーションは，切削力，弾性変形，熱変形，振動など様々な物理現象に関して研究が行われてきた．しかしながら，実加工中での個別の加工状態の推定という観点からみた場合，加工シミュレーションによる予測を基にした加工状態推定に関しては以下のような問題点がある．

1. 個別の加工事例ごとの対象のばらつきに対応できない．
2. 加工プロセスモデルに含まれる経験的パラメータの適用範囲が明確でない．

ここでは，図 5.2 に示すように，空間軸を模式的に一次元 $\mathbf{X}$ で表すこととし，工作物において定義される状態量（$\mathbf{T}$) の推定精度の向上について考える．一般に，標準的なモデルパラメータを用いて計算された状態量（図中 T_a）と局所的な計測情報（t_m）の間にはずれが存在する．計測していない領域 (X_b) も含めて，このずれをできるだけ小さくすることが，高精度な状態推定を実現することになる．そこで，この局所的な計測情報に対して最も合致するように，シミュレーションに用いるパラメータを適宜調節する手法を提案する．この調整により全体の推定精度が向上するためには，シミュレーションによって得られた予測結果は傾向としては妥当であり，加工プロセスの大域的かつ概略的な特徴を推定することが可能であることが前提として必要となる．この前提については，従来のシミュレーション研究において適切なパラメータ同定のもとでは予測精度が確認されていることから，本研究では，この仮定は成り立つものと考える．この手法は，前章で示した，モデルパラメータ学習の考え方を状態推定に適用したものである．センサ情報を前提とした加工シミュレーションであることから，本研究では，この手法を Sensor Configured Simulation と呼ぶこととする．

以下では，Sensor Configured Simulation を工作物温度状態について適用した結果について示すが，同様の手法により工作物把持状態の可視化に対する適用も検討している [寺本 02].

5.3 Sensor Configured Simulation による工作物温度場の推定

5.3.1 工作物温度推定の背景

エンドミル加工などの切削加工において発生する物理現象のなかで，工作物の熱変形は乾式切削の普及により重要性が高まっている．切削加工中の工作物の熱変形に関する研究としては，従来から有限要素法を用いた解析が行われてきた [帯川 92]．しかしながら，解析にあたっては，切削熱の工作物への流入割合や熱伝達率といった，工具の摩耗状態や切屑の排出状況などの加工状況に大きく影響を受ける物理パラメータが存在する．その結果として，十分な作業環境の整備がない場合には，作業ごとに加工状態が大きくばらつき，事前評価が困難になることが多い．そこで，以下では特に加工熱による工作物温度変化に関する加工状態の可視化ついて Sensor Configured Simulation の概念を適用した結果を示す.

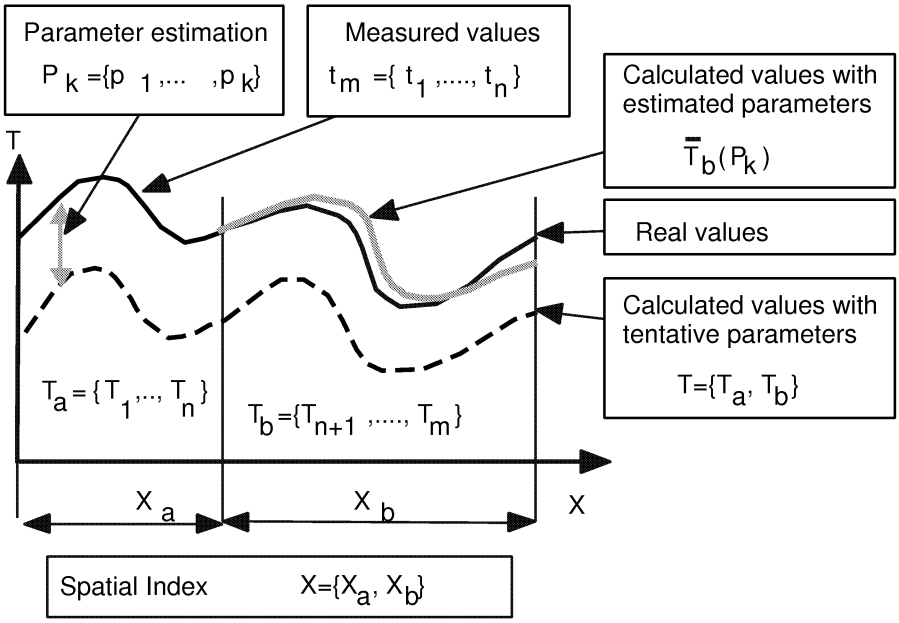


図 5.2 Sensor Configured Simulation の概要

5.3.2 工作物温度の計算方法

切削加工を熱伝導の観点から捉えると，時間経過に依存した非定常熱伝導問題と見なすことができる．工作物内部での伝熱については熱量保存の式やフーリエの法則を適用することにより標準的な解法が確立している．個々の加工事例におけるばらつきを工作物温度推定に反映させるための変動要因として，以下のようなものが考えられる．

1. 幾何学的条件 (被削材，工具および切りくずの形状と寸法)
2. 表面からの空気や切削液への熱伝達の条件
3. 熱伝導率，密度および比熱
4. 被削材内部の各点における温度の分布
5. 被削材内部での塑性変形およびすくい面上での摩擦による発熱量の分布

以上の方程式を解くには，一般に有限要素法などの数値解法が用いられる．計算には，せん断角や切削抵抗などの実測値などの経験的な値を用いざるを得ないが，適切なパラメータが設定されればかなり正確な結果が得られることが判っている [Moriwaki 95].

5.3.3 切削加工中における工作物温度推定法の提案

Sensor Configured Simulation による工作物温度推定 ここでは，時々刻々と変化する工作物の温度分布を，加工の進展と共に随時正確に推定する手法として，前述の Sensor Configured Simulation の適用について述べる．処理の概要は，図 5.3 に示す手順で行われる．以下では，図 5.3 で示した (1) から (5) の処理について述べる．

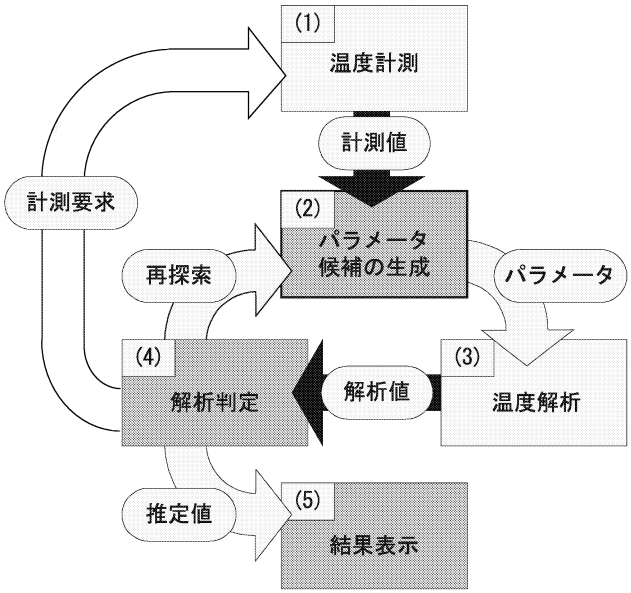


図 5.3 工作物温度推定法の概要

(1) **温度計測**

温度計測の命令を受けると，温度センサを用いて工作物の温度を計測する．工作物の形状や加工条件など，計測の目的に応じて温度計センサの用いる種類や数，計測箇所は異なる．ここで重要となるのは，温度計センサで計測した温度の精度と計測した時刻である．

温度センサで計測した温度は，計測値として解析値の評価を行う際に用いるため，信頼性の高いものでなければならない．また，温度分布推定を行う上で計測した時点の時刻が必要であることから，計測時刻を明確にし，リアルタイム性を考慮して計測要求を受けてから計測値を転送するまでの応答をできるだけ短い時間で処理することが必要である．

(2) **パラメータ候補の生成**

温度解析を行う際，境界条件を設定する必要がある．その時に用いるパラメータの中には，加工状況に応じて変化する不確定な値となるものがある．そこで，温度解析を行う前に，温度解析で用いるパラメータおよびその値を一時的に生成する．

(3) **温度解析（シミュレーション）**

切削加工中の工作物の温度分布の推移を求める．切削加工中の工作物の温度分布は，時間の経過と共に変化する非定常過程である．本研究は，工作物の温度分布解析には非定常熱伝導方程式を適用し，有限要素法を用いて解析を行う．解析に必要な境界条件には，(2) で生成したパラメータおよびその値を用いる．

(4) **解析評価**

温度解析で求めた解析値を，(1) で計測した計測値を用いて評価する．解析評価は，計測値と計測点の解析値との誤差によって評価を行う．解析評価の後，新たにパラメータ候補の生成 (2) を行い，再び温度解析 (3) を行って，その解析値を評価 (4) する．この (2)〜(4) を繰り返し行った中で，計測値と計測点の解析値との誤差が最小となるパラメータの組合

せを見付け（以下，これを**パラメータ同定**と呼ぶ），その値を用いて求めた解析値を温度推定値とみなす．

(5) **結果表示**

加工を行っている作業者に対して，推定結果を提示する．推定結果の提示は，温度をコンター表示し，作業者が温度分布の推移を理解しやすい形で表示する．また，切削加工の進展とともに温度分布の推移を表示することから，高速な描画処理が必要となる．

5.3.4 有限要素法による定式化

３次元非定常熱伝導解析 工作物の温度分布の推定に用いる熱伝導問題を有限要素法を基に定式化すると [矢川 91]，最終的に組み立てられた全体の有限要素式は次のように表現できる．

$$[K]\{T\} + [C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{F\} \tag{5.1}$$

ここで，$\{T\}$ は全体の節点温度ベクトル，$[K]$ は熱伝導マトリックス，$[C]$ は熱容量マトリックス，$\{F\}$ は熱流束ベクトルと呼ばれ，

$$\begin{aligned}
[K] &= \sum_{e=1}^{n}[k] + \sum_{e\in S_3}\int_{S_3^e}\alpha_c N_i N_j \mathrm{d}s \\
[C] &= \sum_{e=1}^{n}[c] \\
\{F\} &= \sum_{e=1}^{n}\{f\} - \sum_{e\in S_2}\int_{S_2^e} q_0 N_i \mathrm{d}s + \sum_{e\in S_3}\int_{S_3^e}\alpha_c T_c N_i \mathrm{d}s
\end{aligned}$$

で与えられる．ここで，$\sum_{e=1}^{n}$ は全要素について足し合わせることを表し，$\sum_{e\in S}$ は境界上の要素辺について足し合わせることを表す．また，N は採用する要素によって決まる内装関数を表し，α_c は熱伝達係数，T_c は外部温度，q_0 は外部からの流入熱流束である．さらに，ここで，$[k]$,$[c]$,$\{f\}$ の各成分は，それぞれ次のように書ける．

$$k_{ij} = \int_{v^e} \kappa \left(\frac{\partial N_i}{\partial x_1}\frac{\partial N_j}{\partial x_1} + \frac{\partial N_i}{\partial x_2}\frac{\partial N_j}{\partial x_2} + \frac{\partial N_i}{\partial x_3}\frac{\partial N_j}{\partial x_3}\right) dv$$

$$c_{ij} = \int_{v^e} \rho c N_i N_j dv$$

$$f_i = \int_{v^e} N_i \dot{Q} dv$$

さらに，式 (5.1) の時間による微分項を後進差分により差分化すると，以下のようになる．

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + [K]\right)\{T\} = \frac{[C]}{\Delta t}\{T^-\} + \{F\} \tag{5.2}$$

ここで，式 (5.2) の右辺 $\{T^{-}\}$ は前の時刻の温度であり，Δt は微小時間増分である．

このように，式 (5.2) を用いて時間経過と共に (Δt ごとに) 逐次解いていくことで，有限要素法による非定常熱伝導問題を解くことができる．

以上の定式化の手順から分かるように，工作物の形状や寸法，節点座標や要素分割などの幾何学的条件や工作物の熱伝導率 κ，比熱 c，密度 ρ といった物性条件，温度や熱流束，熱伝達率等の境界条件，微小時間増分 Δt を定めることで，その時間における節点温度を求めることができる．

工作物と工具のモデル化　本項では，工作物の温度分布推定を行う上で工作物と工具について，前項で述べた有限要素法を用いるためのモデル化について述べる．

1. **工作物**

   本研究では，温度分布推定対象とする工作物に対して，6 面体 8 節点要素を適用して，工作物の形状を近似する．また，バイスなどの取付具によって熱伝達の状態が変わることも考慮して工作物のモデル化を行う．

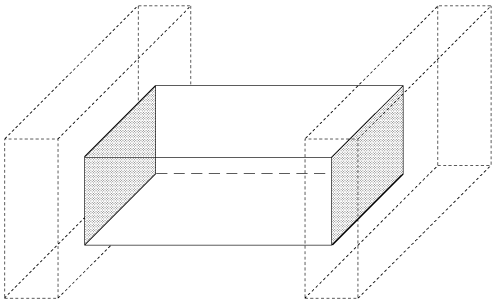


図 5.4 バイスによる工作物把持

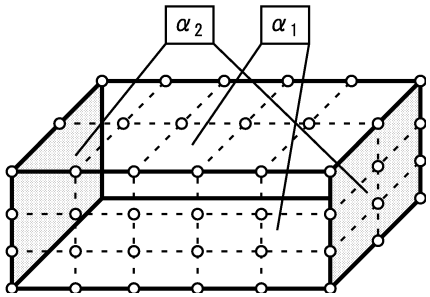


図 5.5 工作物の熱伝達境界

   例えば，図 5.4 のように，バイスで工作物を把持した場合，工作物は 2 枚の平板による締め付け力によって固定される．その際，工作物の表面状態はバイスと接触している面とそうでない面とに分かれる．工作物から流出する熱量は工作物の表面状態によって決定し，熱伝達率 α の値によって定まる．しかし，工作物とバイスとの接触による熱移動は接触熱抵抗に基づく熱伝導である．そこで，工作物からバイスへ移動するモデルに，接触熱抵抗による熱伝導に相当する熱伝達率を設定する．

2. **工具**

   切削加工において工作物から工具を捉えると，工具は工作物に切削熱を流入させながら時間の経過と共に場所を移動する移動熱源とみなすことができる．以下では，工具のモデルについて工具位置と流入熱量の 2 点から述べる．

   - **工具位置**

     工具の位置は，切削加工の進展と共に移動する．本研究では，NC 工作機械による切削加工を対象にしていることから，NC コードによって工具の移動速度，位置を求め

ることができる．つまり，NC コードから工作物に切削熱が流入する節点を決定することができる．

- **流入熱量**

  前章でも述べたとおり，工具から工作物へ流入する切削熱量を求めることは困難である．そのため，本研究では工作物へ流入する切削熱量も推定の対象とする．なお，工作物へ流入する切削熱量は境界条件として熱流束拘束あるいは温度拘束として与えることができる．ここでは，推定した切削熱量を工作物モデル上の節点に対して与える方法として，工具位置に相当する節点に，順次流入熱を与える．すなわち，工具の移動に伴って流入熱を与える節点の位置を移動させることになる．

以上に述べたモデルを用いて 3 次元非定常熱伝導の有限要素解析を行い，工作物の温度分布を求める．

計測と推定の流れ　ここでは，第 5.3.3 節で述べた温度計測と温度解析を用いた温度推定についてい示す．

時刻 t_m において，温度センサで計測する計測点の数を k とした時の計測温度を $\{T_{m,k}\}$ とする．ここで，あるパラメータの組によって式 (5.2) で求めた $\{T\}$ のうち計測点に対応する解析温度 $\{T_{s,k}\}$ を求め，評価関数 S

$$S = S(T_{s,k}, T_{m,k}) \tag{5.3}$$

によって $\{T_{s,k}\}$ を $\{T_{m,k}\}$ を用いて評価する．式 (5.3) によって評価した $\{T_{s,k}\}$ の中から $\{T_{m,k}\}$ との誤差が最も小さい時の $\{T_{s,k}\}$ を含む $\{T\}$ を推定値 $\{T_e\}$ とし，これを計測時刻 t_m での全節点の温度とみなす．ここで，前回の推定温度 $T^{-}_{s,k}$ を求めた時間との時間差 Δt は事前に決定しておく必要がある．実時間での状態推定を行うためには，温度推定時間 $(t_m - t_s)$ が Δt より短いことが必要となる．

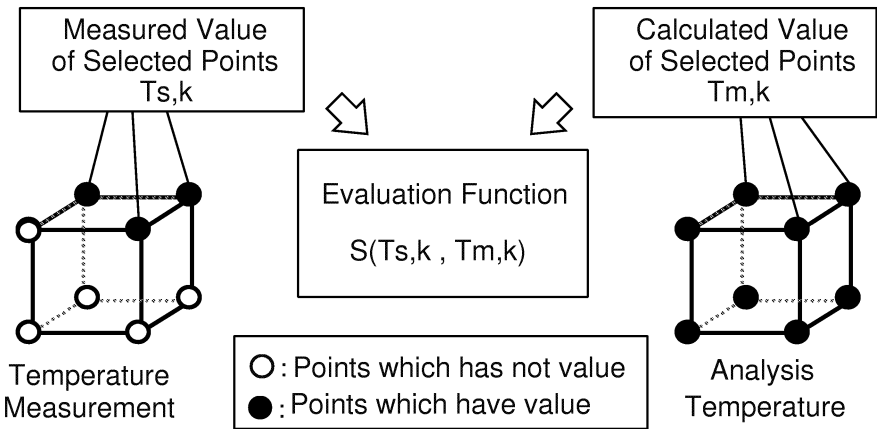


図 5.6 温度計測を用いた温度解析の評価

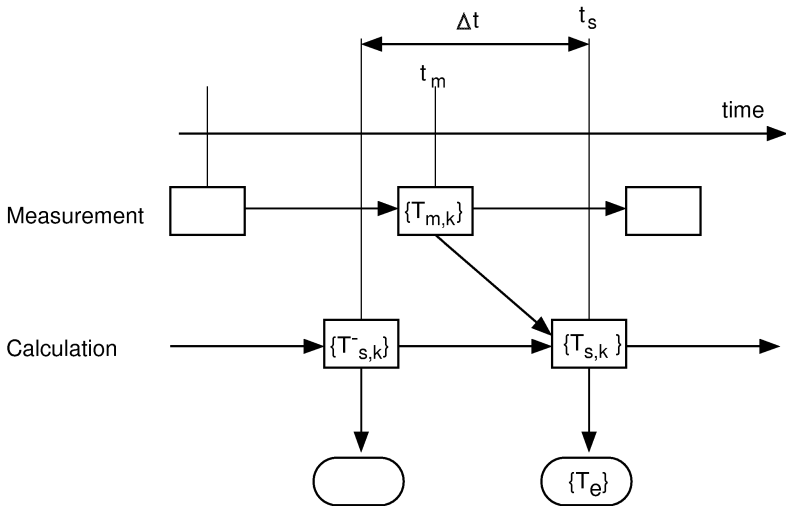


図 5.7 計測プロセスの時間流れ

5.4 工作物温度分布推定システムの実装

本節では，前節で提案した手法に基づいて試作したシステムについて述べる．まず，試作システムについて概観する．そして，試作システムの構成要素ごとにその役割および処理内容について述べる．最後に，構成要素を組み合わせたシステム全体の処理手順および時間経過による処理流れについて述べる．

5.4.1 試作システムの概要

本節では，試作したシステムの概要について述べる．試作したシステムは，提案した工作物温度推定法に基づき，計測情報を基にパラメータ同定を行いながら温度推定値を行うシステムである．計測情報として，切削温度の計測によく用いられる熱電対により計測した工作物と工作物周囲の温度を用いる．また，シミュレーションは，計算機を用いて有限要素法による 3 次元非定常熱伝導解析を行う．図 5.8 は，試作した工作物の温度分布推定システムの概要図である．システムを構成するのは，有限要素解析と可視化を行う計算機，データ計測を行う熱電対とデータコレクタである．また，将来的に工作機械との情報の授受を行う機能モジュールとしてデータサーバを設定している．今回の実装においては，データサーバは有限要素解析を行う計算機と同一計算機内に実装されている．なお，実際の切削加工においては切削油剤や空気の対流などの外乱成分が多いことから，以下では制御された環境下において本手法の推定精度の検討結果について示す．

5.4.2 試作システムの構成要素とその役割

ここでは，試作システムの構成要素についてそれぞれ個別に述べる．

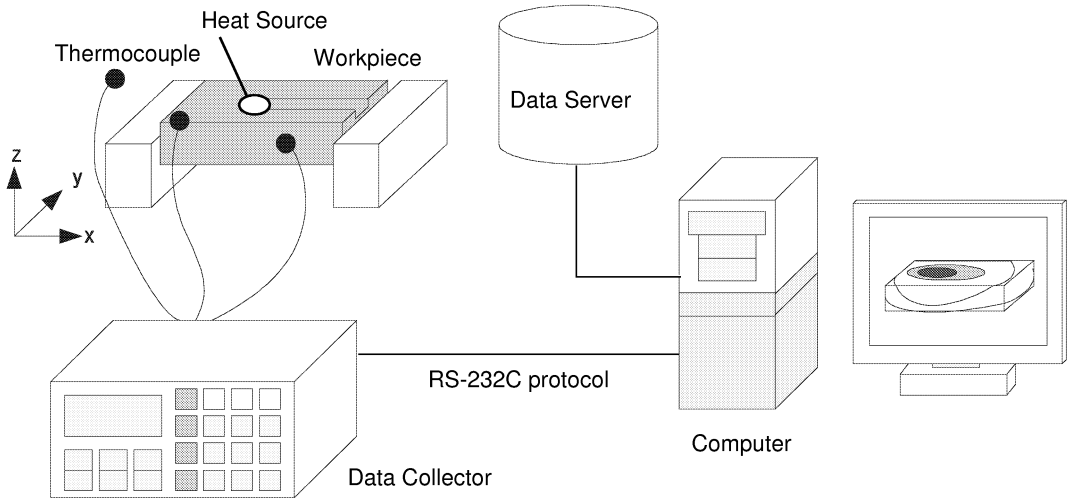


図 5.8 試作システムの概要

熱電対 熱電対は，切削温度の計測に幅広く使用されており，切り屑や切削液などの外乱の影響を受けにくいと言われている．本研究においても工作物の温度計測には熱電対（安立計器株式会社製）を用いる．他にも，有限要素解析に工作物の周囲温度を用いることから，工作物温度と同様に熱電対で工作物の周囲温度を計測する．前章で述べたとおり，熱電対で計測した値はパラメータ同定によって求めた温度解析の評価に用いるが，この時，計測点のレイアウトが推定値の精度に影響を及ぼすと考えられる．また，計測点のレイアウトを決定する際，計測点の被削の有無や位置決め誤差，工具経路の干渉などを考慮する必要がある．

データコレクタ データコレクタでは，熱電対が計測した温度を AD 変換し，計算機に転送する．本研究では，データコレクタに AM-7200（安立計器株式会社製）を用いる．この装置は，RS232C インタフェースを標準装備しており，最大 20 個の熱電対を使用することが出来る．

データサーバ エンドミルの工具情報と工作物モデルに関するデータを計算機に送信する役割を果たす．エンドミルの工具情報は，工具の中心位置および半径である．また，工作物モデルに関するデータは工作物の有限要素法に基づいた近似モデルのことを指し，工作物への流入熱量 q，熱伝達率 α を扱う．今回の実験ではエンドミルに相当する部分は既知として扱った．

計算機 計算機では，工作物の温度分布推定と推定結果の表示を行う．計算機は，Sun Microsystems 社製エンジニアリングワークステーション Ultra 30 を用いる．

温度分布推定で行う解析には，3 次元非定常熱伝導の有限要素解析プログラムで解析を行う．解析に必要な工作物の周囲温度および解析結果の評価に用いる工作物の温度に関しては，データコレクタに計測要求を送信し，各熱電対で計測した温度データを受信する．また，推定結果をコンター表示することにより温度状態を可視化する．

次節では，これらの機器を用いた解析処理について述べる．

5.4.3 試作システムの処理

本節ではまず，構成要素ごとの処理内容について述べる．そして，試作システム全体での処理について述べる．

構成要素における処理 以下では，試作システム内の個々の構成要素内での処理について，実装に用いた機器の校正を含めて構成要素ごとに述べる．

熱電対とデータコレクタ 計算機からの計測要求に応じて工作物の温度と工作物の周囲温度の計測を行い，そのデータをデータコレクタを通じて計算機へ転送する．本システムでは，データコレクタと計算機との通信を以下の仕様で行う．

インタフェース規格：RS232C

転送レート：9600 b.p.s

転送フォーマット：7 ビット 奇数パリティ 1 ストップビット

本システムでは，データコレクタ AM-7200 の有する機能，リアルタイム計測データ転送をハンドシェイク機能を用いて通信を行う．これは，計算機から RS232C インタフェースを介してコマンドを転送することによって計算機側からデータコレクタを制御できる機能である．これにより，熱電対で計測した工作物の温度データの計測・取得を，計算機からコマンドを送信することで制御し，ほぼリアルタイムにデータの転送を行うことが可能となる．

計算機 計算機での処理内容は，温度解析，解析値の判定，データの取得，結果表示の 4 つに分けることができる．

温度解析には，C 言語で作成した 3 次元非定常熱伝導の有限要素解析プログラムを用いる．本研究では，有限要素解析で用いる要素に 6 面体 8 節点要素を用いる．有限要素解析を行う際，熱流束 q と熱伝達率 α が必要となる．これらの値は加工状況により変動することから，これらを推定するパラメータとして取り扱う．具体的には，データサーバ内に事前にパラメータの候補を準備しておき，その候補に対して計算を行う．

解析値の判定は，有限要素解析で求めた解析値と熱電対で計測した計測値を用いて解析値と計測値の誤差が最小となるようにパラメータ同定を行う．いま，工作物の計測点の数を n とし，計測点番号を i，温度計測時刻を t として，解析値を $T_{s,i,t}$，計測値を $T_{m,i,t}$ と表す．本研究では，誤差の評価関数として，以下の評価関数 S を用いる．

$$\boldsymbol{S = \sum_{i=1}^{n} (T_{s,i,t} - T_{m,i,t})^2} \tag{5.4}$$

この評価関数を最小とする，パラメータの組を探索する．探索方法については様々なものが考えられるが，処理時間が正確に見積もれることと推定するパラメータの取り得る範囲が大まかに予測できることから，全探索による評価を行うこととした．

また，推定結果の表示には，Open-GL を用いて実装した表示プログラムにより 3 次元グラフィックスとして表示する．

データサーバ 工作物モデルに関するデータを，解析に応じて計算機に転送する．工作物モデルに関するデータは，工作物への熱流入量 $\boldsymbol{q}$ の場合，加工条件からパラメータ同定の際に用いる値の範囲を求める．また，熱伝達率 $\boldsymbol{\alpha}$ の場合，切削加工中の工作物の表面状態に応じて $\boldsymbol{\alpha}$ の種類を設定し，パラメータ同定の際に用いる値の範囲を求める．

次項では，これらを組み合わせたシステム全体としての処理流れについて述べる．

試作システム全体の処理 前項で述べた構成要素の処理をシステム全体の処理手順としてまとめると図 5.9 のようになる．以下，図 5.9 について述べる．なお，(1)〜(8) は，図 5.9 中の番号に対応している．

本システムでは，エンドミルによる仕上げ加工を対象とした工作物温度分布推定を行う．そのため，切削加工による体積除去は考慮にしないことにする．つまり，切削加工中の工作物の体積は常に一定であり形状は変化しないため，工作物の形状データは事前に用意しておくことにする．

1. 工作物の初期温度は，切削開始直後は全面が均一であり，それ以降は，前時間ステップで得た解析結果 (6) を用いる．
2. 計算機からの計測要求により，データコレクタからは熱電対で計測した温度データを取得する．
3. データサーバにおいて工具からの流入熱量 q および熱伝達率 α の値の候補を生成し有限要素解析の入力情報とする．
4. 仮決定した流入熱量 q と熱伝達率 α を用いて有限要素解析を行う．
5. 解析値を計測値を用いて式 (5.4) で評価し，仮決定した流入熱量 q と熱伝達率 α を評価する．
6. 評価を行った結果，計測値と最も誤差の少ない解析値を最適解（推定値）として求める．
7. 温度推定結果を 3D コンター表示する．
8. 切削加工が終了しているかどうかを判別する．終了していなければ，1. へ戻り，再び同じ手順を繰り返す．

このように，1.〜8. までのプロセス 1 回が 1 ステップの処理であり，この処理にかかる時間が時間ステップ (Δt) である．この Δt の値が小さければ小さい程計測してから推定結果を提示するまでのタイムラグが少なくなり，システムのリアルタイム性が向上する．

温度解析の更新は，先程述べた 1 ステップの処理を切削時間の進展と共に繰り返し行う．状態 n の推定温度 $T_{s,n}$ が求まると，次の状態 $n+1$ の工作物の温度および工作物の周囲温度を計測し，パラメータ同定を行って解析温度を求める．このようにして，切削加工が終了するまで工作物の温度分布推定を続ける．

以上が，試作したシステムについての処理内容である．次節では，この試作システムを用いて工作物の温度分布を推定する．

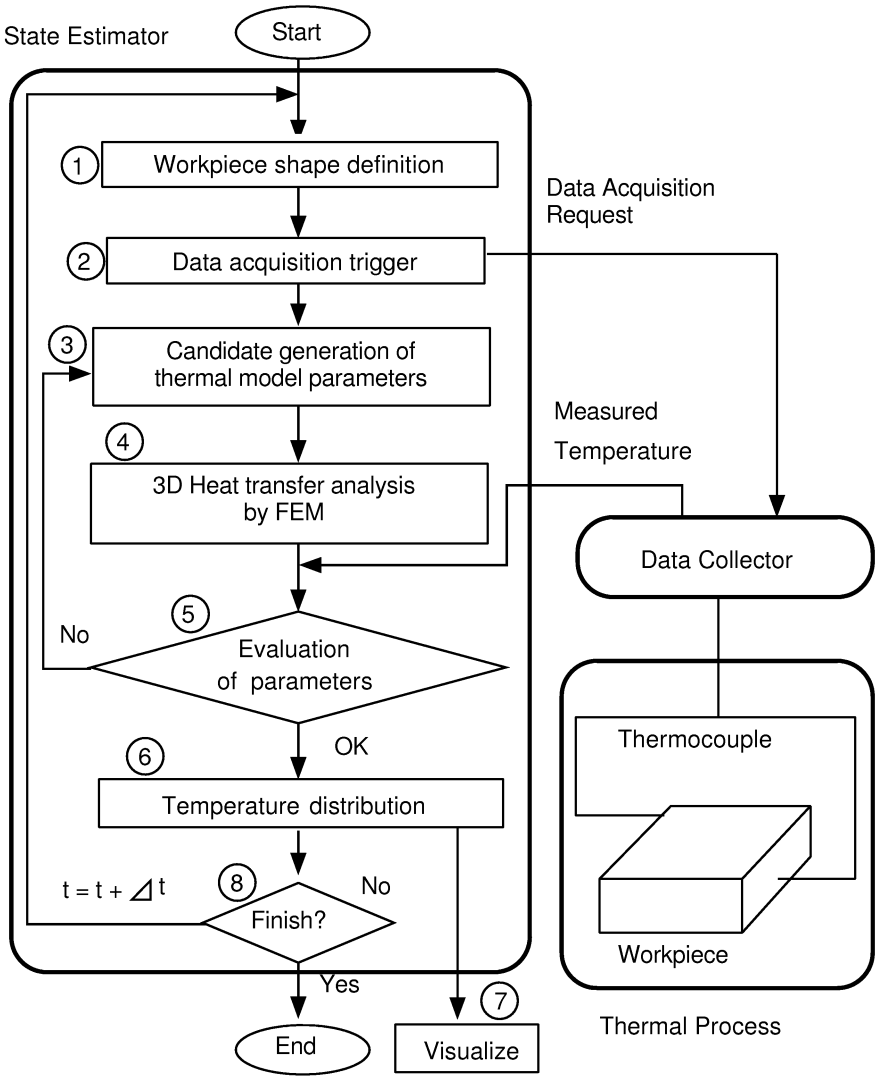


図 5.9 システムの処理手順

5.5 試作システムの評価

本節では，前章で実装した試作システムを用いて工作物の温度分布推定を行い，試作システムを評価する．まず，計測温度の推定が行えているかどうかについて確認する．次に，パラメータ同定について，異なる温度場で温度計測を行い比較・検討する．

5.5.1 試作システムの評価実験概要

本研究において実装した試作システムの有用性を検証するためには，システムで用いられるモデルについての評価が必要である．そこで，工作物の温度分布を推定する上で，パラメータ同定による状況変化への適応が行われているかどうかについて検証した．なお，熱源としては，一定温度を保持できる熱源を用いることにより，安定した実験条件での評価を行った．また，

温度推定を行う工作物は，構造炭素鋼 S50C を用いた．

5.5.2 推定温度の評価

まず，試作システムが適切に温度推定を行えるかどうかについて検証した．

実験方法

この実験では，図 5.10(a) の直方体形状の工作物を対象に計測点の温度データを用いて工作物全体の温度分布を推定し，評価点 A,B における計測値と推定値を比較する．計測点および評価に用いた点の温度変化を図 5.10(b) に示す．

実験は，熱源を図 5.10(a) の位置に固定して 1 時間工作物を加熱し続ける．工作物は，微小な支持領域を除き周囲の空気とだけ接触しているような状態を保ち，熱電対を図 5.10(a) に示す 11 箇所に接着して，3 分おきに温度を計測する．ここで計測点のうち，2 つの点は評価のみに用いることとし，温度場の推定には用いない．

実験結果および考察

計測点の温度を計測し，点 A,B の推定値を求めた．点 A および点 B での計測値と推定値が時間と共に変化する様子を図 5.10(b) に示す．図 5.10(b) に示した推定値は，計測点に相当する位置での温度推定値であり，計測開始以降，各 Ch において計測値と推定値との誤差は全て 2 ℃以内となり，計測値に近い値を得ることができた．また，60 分後の温度分布の状態を図 5.10(c) に示す．

5.5.3 パラメータ同定による状況変化への適応

さらに，推定条件が変化した場合について検証するために推定における環境を変化させた事例について，推定したパラメータについて検証した．

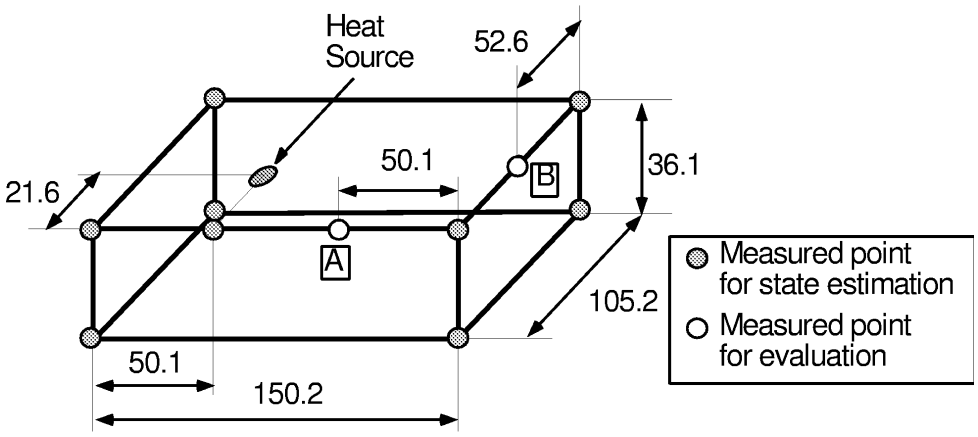
実験内容

工作物への流入熱量 q と熱伝達率 α のパラメータ同定による状況変化への適応について検証を行う．以下の 3 つの異なる状況下で実験を行い，各場合における工作物への流入熱量 q と熱伝達率 α の推定値の時間経過による変化を求める．ただし，パラメータ同定に用いる熱伝達率 α は一種類で一様とし熱源移動の伴わない場合での実験を対象とする．実験には図 5.11 に示した直方体形状の工作物を用いる．熱源は図 5.12 に示した位置に固定し 60 分間工作物を加熱し続ける．工作物は微小な支持領域を除き周囲の空気とだけ接触しているような状態を保ち，熱電対を図 5.12 に示す 10 箇所に接着して，3 分おきに計測を行う．実験で用いる熱源の温度を 400 ℃に固定して工作物を加熱し続ける．

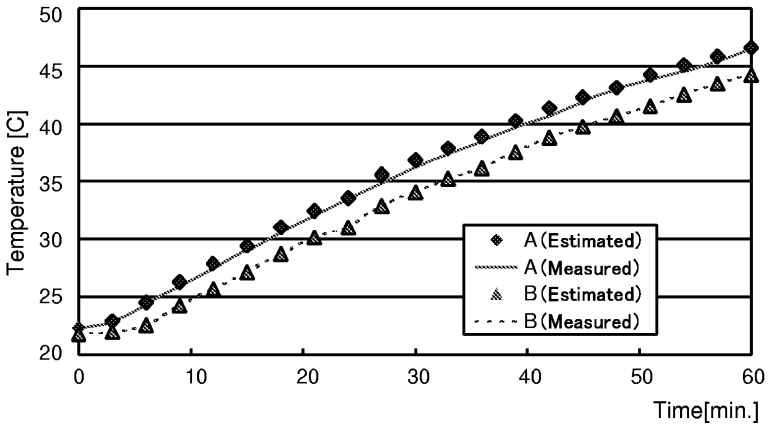
1. 比較的涼しい所（平均気温 14.2 ℃，送風なし）
2. 比較的暖かい所（平均気温 22.2 ℃，送風なし）
3. 比較的暖かい所（平均気温 21.4 ℃，送風あり）

なお，温度推定の際，熱流入量 q および熱伝達率 α は，

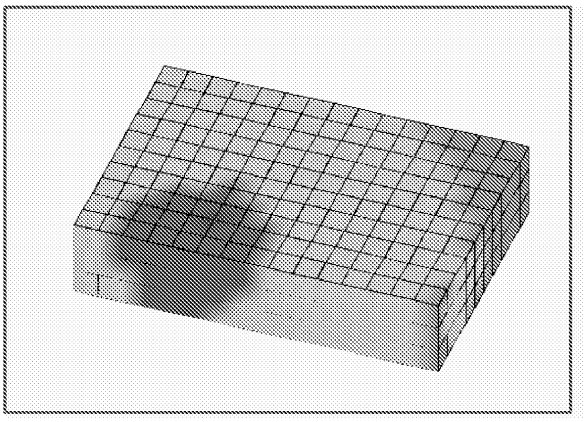
$$0.0 \leqq q \leqq 10.0$$



(a) Shape of workpiece



(b) Estimated and measured temperature



(c)Temperature distribution at 60 min.

図 5.10 温度評価実験

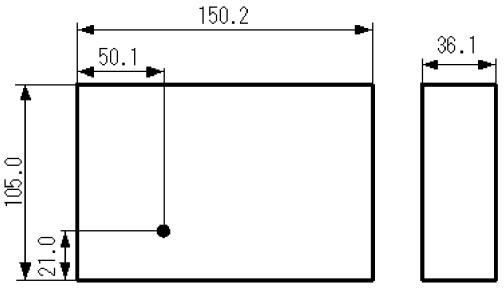


図 5.11 工作物の形状

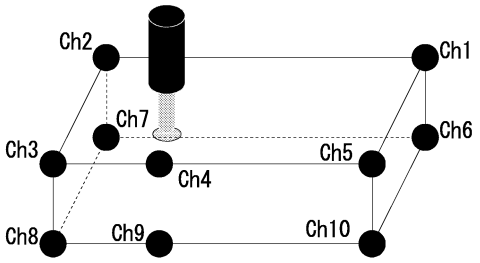


図 5.12 パラメータ同定に関する実験概要

$$0.0 \leqq \alpha \leqq 1.00 \times 10^{-4}$$

の範囲でパラメータ同定を行う．ただし，q は 1.0[J] おきに，α は $5.00 \times 10^{-6}[W/(mm^2 \cdot K)]$ おきに全探索を行い，推定値を求める．

実験結果および考察

(a)〜(c) の各場合における工作物への流入熱量 q と熱伝達率 α について，時間の経過による変化を求めた．図 5.13，図 5.14 にそれぞれの推定結果を示す．以下，工作物への流入熱量 q，熱伝達率 α についてそれぞれ考察する．

- **工作物への流入熱量 q**

  工作物への流入熱量 q について，まとめたのが図 5.13 である．これから，工作物へ流入した熱量の推定値は全体としてみればほぼ一定に近いと言える．これは，熱源が温度制御されていることから，妥当な結果であるといえる．しかしながら，30 分以降では大きく誤差が出ており，精度向上のための改良の必要性を示している．

- **熱伝達率 α**

  (a)〜(c) の各場合の熱伝達率 α をまとめた図 5.14 から，同定した熱伝達率 α の値は，時間の経過と共に変化していることと，周囲の温度状況によってもその値は異なることが分かる．時間に伴う変化は，推定値の収束過程と考えられる．すなわち，計測初期段階では計測情報の変化が小さいため推定値がばらつきやすい．しかしながら，計測情報の変化が小さいということは外部に流出する熱量も小さいことから推定精度に対する影響は小さいと考えられる．また，実験条件による違いは，熱伝達率 α は変動の大きいパラメータであることを実証しており，今回のような比較的単純な条件下においてもばらつきがあることから，切り屑や加工雰囲気が変わりやすい切削加工下においては，さらに値にばらつきがあることが予想される．これは，提案した手法の適用が必要であることを示している．

以上に述べたように，工作物への流入熱量 q と熱伝達率 α のパラメータ同定によって，温度条件が異っても状況に対応できる工作物の温度分布推定を行うことができることを示した．

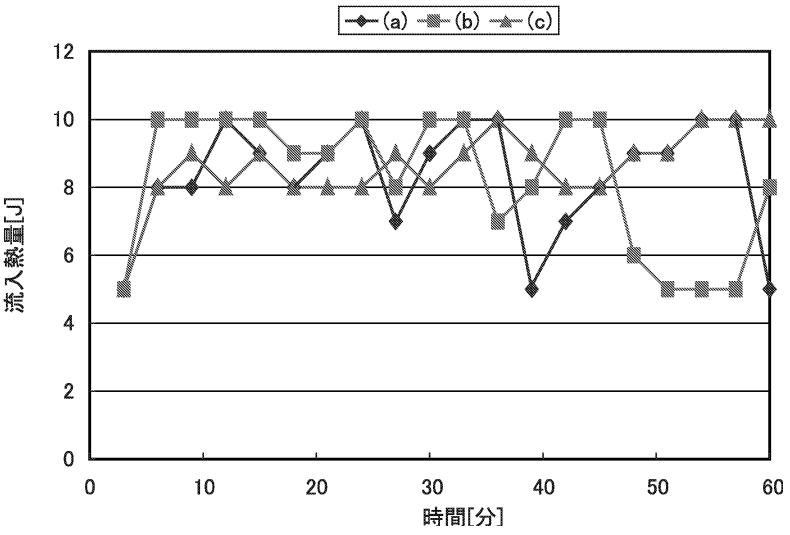


図 5.13 熱流入量 q の比較

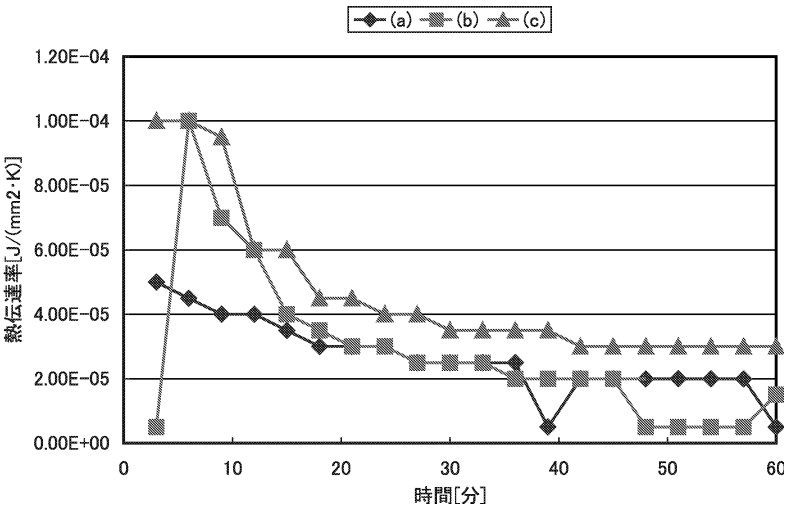


図 5.14 熱伝達率 α の比較

5.6 工作物温度推定の結論

本章では，計測情報とシミュレーションを併用して，時々刻々と変化する切削加工中の工作物の温度分布を高精度に推定する手法を提案した．まず，加工状態提示の枠組について整理した後，提案した手法に対する基礎的検証のために，熱源を固定した非定常熱伝達問題に対して，温度推定を行った．提案した手法は，シミュレーションに必要なパラメータを局所的な計測情報から近似的に推定することによって，計測値と計測点での解析値の誤差が最小となる解析値を求め，その求めた解析値を推定値とするものである．そして，推定した温度場を 3D 表示することにより可視化し，作業者に提示できるシステムを構築した．実験の結果，本手法により

高精度な温度分布の推定が行えることを確認した．本章の具体的な成果は以下の 2 つである．

- **Sensor Configured Simulation による工作物温度推定の提案**

  Sensor Configured Simulation を温度推定に適用することで，シミュレーションの精度向上を図り，信頼性が高く大域的な温度情報を推定する手法の提案を行った．そして，提案した手法をもとに，工作物温度推定のためのシステム構成を示した．

- **逐次パラメータ同定による変動環境下での温度推定**

  試作システムはモデル評価の段階ではあるが，工作物へ熱が流入する過程において，値がばらつく熱伝達率や計測の難しい工作物への流入熱量のパラメータを同定することにより，精度の高い温度推定を行うことができた．これにより，パラメータを同定することで切削加工中の様々な状況変化に対して柔軟な温度推定が行える可能性があることを示した．

工作物の温度分布以外の多様な現象に本手法を適用することにより，作業者の多面的で効果的な加工状態認識を支援できると考えられる．

参考文献

[大山 94] 大山 英明，館 暲，井上 康之，“仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法”，日本ロボット学会誌，Vol.12, No.2, pp.272-281(1994)

[Kimura 98] F. Kimura, H. Lipson, M. Shpitalni, ”Engineering Environments in the Information Age: Research Challenge and Opportunities”, Annals of the CIRP, Vol.47, No.1, pp87-90(1998)

[寺本 02] 寺本 孝司，小野里 雅彦，2002 年度精密工学会秋季大会講演論文集，pp.467(2002)

[帯川 92] 帯川 利之，海老原 克司，松村 隆，白樫 高洋: MC によるエンドミル加工の精度予測，1992 年度精密工学会春季大会講演論文集，pp.167-168(1992).

[Moriwaki 95] Moriwaki, T., Emwardy and Wang, Lihui, 1995, ”Study on Machining Error Due to Cutting Heat in Endmillimg”, Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University. pp. 131-140(1995)

[伝熱工学資料 75] 社団法人 日本機械学会：伝熱工学資料（改訂第 4 版），pp.293(1975).

[矢川 91] 矢川 元基，吉村 忍: 有限要素法，培風館 (1991).

第6章　整合的作業設計とシステムの再構成

本章では，作業者の意思決定を支援するための作業設計案提示の基盤となる整合的作業設計に関して述べる．ここでは，取り付け設計と加工条件の整合的決定に焦点を当てて議論を行う．これらの項目は，最も基本的な決定項目であるにもかかわらず従来個別に取り扱われてきた．ここでの整合的な決定の枠組みは，段取りやツーリングといったより広い対象を含めた決定に対しても拡張が可能である．作業者は，本章で提案する手法によって求められた作業条件案を基に独自の経験やシミュレーション結果を考慮して最終的な作業計画を立案する．また，作業設計システムの再構成のための手法についても示す．

6.1　作業準備段階での作業設計支援

作業設計とは，個々の事例に対して，第4.1.1節の表4.1に示したように，加工における評価尺度を良好にするように加工条件に代表される変動項目を決定する過程と言える．第3章での議論でも示したように，現在においては，決定項目は細分化され個別に決定されている．特に顕著なのが，工作物把持条件と加工条件の決定における乖離である．より詳細には，加工条件の設定においても，工具経路の生成と，送りや回転数などの切削条件の決定との間でも部分問題同士の齟齬が生じる場合もある．今後，加工ワークステーションの高度化が進むと，段取りや工具種類の決定などについても，一貫した条件設定が必要となると考えられる．さらに将来的には，作業設計条件を考慮した監視計画や検査手法の決定といったものまで複雑に関連してくることが予想される．そこで，本節では，このような問題を解決する上で必要となる機能の整理と支援システムの構成について検討する．

まず，個別に決定される断片的な作業設計案群を整合的に合成する上で注意する必要があるのは，全ての決定案の導出を自動的に行うのではなく，作業者が有する部分的な決定に対するノウハウとの親和性を有する枠組みが必要であるという点である．これは，システム使用時に，過去の失敗事例などの作業者の有する局所的な事例知識を適用することにより，設計空間を縮退させて解の導出を容易にすることが期待できるからである．

また，断片的な作業設計において用いられる知識やルールは，自動化された計算モジュールにおいてさえも，一般に相互に整合性は取れていないと考えられる．従って，作業設計問題の解決過程においては設計案に不整合が存在することを許容する問題解決の枠組みが必要とされる．

さらに，断片的な作業設計間での調整を行うための明確なルールや知識は一般には存在しないと考えられる．そこで，従来は，工程設計段階において幾何学的な観点からそれぞれの部分問題で考慮する領域を排他的に分割していた．そして，この分割された領域に対する部分問題を作業設計段階で個別に処理してきた．即ち，このように独立した個別の部分問題間を考えることにより部分問題間の調整を回避してきたと言える．

工程設計段階での熟練作業者の分析からは [Iwata 89][井原 98]，以下の2点が部分問題への分割に際して考慮する必要があることが示されている．

- 決定項目を逐次決定していく順序が固定的に定まっているわけではなく，問題ごとに機

会主義的な決定 [Hayes 91] が行われている．

- 個々の作業ごとに評価尺度が異なり，それに応じて対象の捉え方も変化する．即ち，問題ごとに部分問題の分割方法や調整方法も変わってくる．

以上のような機能を実現するためには，黒板モデルに代表される「機能的に正確で協力的」(FA/C: Functionaly acurate / cooperative) な分散問題解決方式の適用が有効であると考えられる [石田 96]．そして，部分問題間の調整に関しては，作業設計案全体に対する物理現象レベルでの評価をベースに個別の作業設計案を統合することを提案する．これは，異なる機能に対する作業設計項目間の調整を物理現象レベルでの評価を介して行うことを意味する．即ち，第 4 章で示した加工プロセス表現の枠組みに基づいて考慮する加工対象範囲や物理相を適宜作業者が選択することにより，個々の作業ごとの特徴に応じた問題間の調整を実現する．これは，前述のノウハウの適用に続く第二の作業者の介入レベルとも理解できる．

さらに，多様な評価を実現するためには，ある特定の指標に対して不必要に最適化されることは問題の解決の妨げになることが多い．たとえば，加重和として多目的評価関数を形式的に単一目的として評価を行う場合でも，個々の評価をどの程度重視するかという重みの決定自体が新たな問題となる．このようなことから，作業設計を何らかの評価指標に対する最適化過程として捉えることは適当ではないと考えられる．むしろ，各評価尺度に対する満足水準を前提とした，要求に対する制約充足としての取り扱いが必要であると考えられる．

また，二つのレベルでの介入機能に加えて，第 2 章において示したように継続的なシステムの利用のためには，状況に応じた作業者によるシステムの再構成が不可欠である．従って，第三の作業者の介入レベルとして，システムの再構成を含めた枠組みでの作業遂行が必要であると考えられる．

以上示した必要機能の分析から，本研究の対象とする整合的作業設計のためには，システム構築，問題解決の評価尺度の設定，部分問題解決，の 3 つのレベルでの作業者の介入を前提とした分散制約充足問題として取り扱うことが適当であると言える．

以下では，まず工作物把持と加工条件の整合性を維持した問題解決のための手法について述べる．続いて，作業者による作業設計システムの再構築について示す．

6.2 工作物把持と加工条件の整合的決定

工作物の把持方法と加工条件の設定は，相互に密接な関係があるにも関わらず個別に生成されることが多い．これは，両者を同時に考慮した問題解決が複雑なものとなり，従来の手法では解を得ることが困難であることが原因であると考えられる．しかしながら，後述するように複雑な形状や薄肉部品の高精度加工においては両者の関係を考慮することが不可欠である．第 2 章で述べたとおり，従来の作業設計に関する研究の多くは，加工条件の設定を対象としており，工作物の把持に関する研究は作業設とは独立して取り扱われてきた．

加工条件と工作物把持方法を逐次的かつ独立に決定する場合を例に，問題点について整理する．加工条件の決定においては，把持方法に対する情報が存在しないので，工作物把持の容易さや安定性などへ配慮することはできない．すなわち，加工条件としては同等な評価を有する

候補が複数存在しても，恣意的にそれらのなかから選択することになる．一方，工作物把持方法の決定においては，加工条件はすでに決定済みの項目であり，変更不可能な制約として扱うことになる．これは，必要以上に制約の大きな問題を解くことになる．その結果，十分な効率や精度を実現する作業設計を行うことが困難になると考えられる．

このような問題は，作業支援においても大きな問題となる．すなわち，加工作業を一貫して支援するためには，従来のように個別の問題解決結果を作業者に提示するだけでは不十分である．支援システムの機能として必要とされるのは，整合的に導出された解を作業者に提示したり，作業者の経験に基づく部分的な問題解決案と自動処理によって求められた解決案の間での整合性について示すことである．そこで，工作物把持方法と加工条件の両者を考慮した作業設計問題を対象として検討を行った．以下では，工作物把持方法と加工条件の決定を整合的に行うための方法論について述べる．

6.2.1　工作物把持方法と加工条件の相互関連

まず，工作物把持方法と加工条件の決定がどのように関連しているかについて検討する．作業設計において，把持方法および加工条件はいくつかの設計項目を含むと考えることができる．いま，把持方法および加工条件の設計項目を夫々 fp_i, mp_j で表す．作業設計は，全ての設計項目について，精度やコストといった事前に決定される加工要求を満たすように決定するプロセスである．しかしながら，加工プロセスは複雑な現象であるので，全ての設計項目を一括して決定することは困難である．そこで，従来から行われてきた研究の多くは，作業設計を部分的な問題解決に分割するために 2 つの仮定を導入している．第一の仮定は，当初の作業設計問題は個別の設計項目の決定問題へ分割可能であるというものである．第二の仮定は，切削力や温度といった物理指標 (Physical Indices) に対する制約の記述によって加工要求を代替できるというものである．ここで，個々の物理指標を pi_k で表す．この 2 つの仮定を用いることにより，図 6.1 に示すように，全ての分割された部分問題を独立に解くことが可能であると考えられてきた．

いま，主に力学的観点からエンドミル加工における設計項目と物理指標をまとめると表 6.1 のようになる．列挙された物理指標を検討してみると，部分問題が独立であるための条件は以下の 2 つが必要である．

- 加工領域と把持領域が明確に分離されている．
- 想定される切削力に比べて工作物と工作機械の機械剛性が十分高い．

これは，金型加工などの特殊な加工以外では，満たされることの少ない仮定である．特に，近年重要視されている薄肉形状や複雑形状を有する部品の高精度加工においてはこのような仮定を満たすのは困難である．さらに，既存の作業設計システムは独自の評価指標を用いているため，全体として一貫性を欠いた作業設計が行われていることが多い．従って，物理指標による加工要求の代替性も保証されないことが多い．

以上のような議論から，一貫した作業設計を行うためには，以下に示すような 2 つの相互関連について考慮する必要があることが分かる．これを図示すると図 6.2 のようになる．

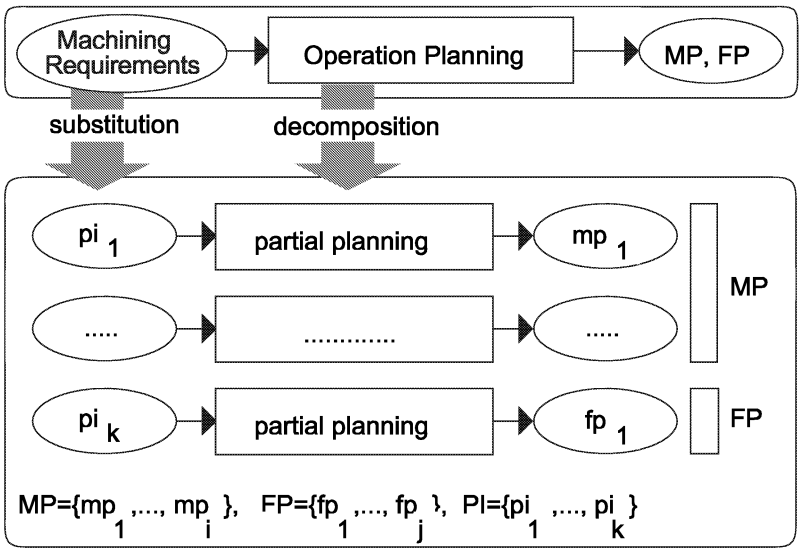


図 6.1 作業設計問題の分割

表 6.1 力学的側面に注目した作業設計項目と物理指標

	Machining	Fixturing
plan items	Tool Type Tool Path Feed rate Spindle Speed	Fixture Element Clumping Force Clumping Point
Physical Indexes	Geometric Accuracy Interference Workpiece Deformation Tool Deflection Machining Force Vibration Tool Wear Machining Time	Interference Workpiece Deformation Static Stability Dynamic Stability Locating Accuracy

物理相互依存性 物理指標（pi_u）は，把持方法（fp_n）および加工方法（mp_m）の双方に影響される．

評価相互依存性 設計項目（fp_n もしくは mp_m）は，複数の物理指標（$pi_u, pi_k, u \neq k$）により影響される．

前者の相互依存性は従来経験的に工程設計において取り扱われてきた設計項目間の相互関連に起因する．エンドミル加工では，干渉，把持安定性，弾性変形，動的安定性の 4 つの指標が工作物把持および加工条件の双方に関連している．物理整合性とは，これらの指標が要求を満たしているかどうかを意味する．後者の相互依存性は，評価のばらつきに起因する．評価相互依存性を評価するに当たっては，値の一意性の保証と物理指標の傾向の同等性を評価する必要

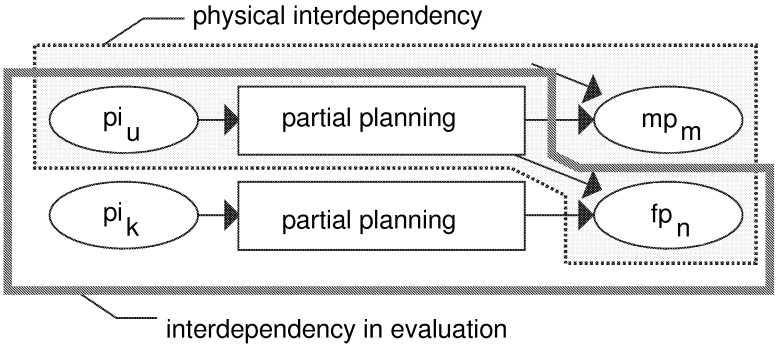


図 6.2 工作物把持方法と加工条件の相互関連

がある．これらは，得られた設計項目の値の比較と設計項目に対する物理指標の感度の比較などにより評価可能である．すなわち，評価整合性とは，設計値の一意性と物理指標の定性的な傾向の類似性と定義できる．本研究では，以上の 2 つの整合性を維持することにより一貫した作業設計が可能であるとの仮定のもとにシステムを開発した．

ここで，工作物把持方法と加工条件の決定の手順を例に作業計画における決定要因間の相互関係を示す．工作物把持方法を決定するに当たって，評価尺度として用いられる把持の安定性や工具干渉などの解析には，具体的な加工条件が必要となる．一方，加工条件を決定する時には，工作物の変形や振動の解析を行うので，具体的な把持の位置や力が必要となる．このように，詳細な解析に基づいて作業設計を行おうとすると，両者が相互に影響しあって個別に決定することが困難となる．

工作物把持方法と加工条件の決定は，作業設計においては個別に取り扱われることの多い一方で，工程設計に関する研究では従来から両者の決定の相互関連について指摘されてきた [Iwata 89][Ong 94a]．しかしながら，工程設計という情報の抽象度の高い段階において，両者の決定を関連付けるためには工作物把持と被削材除去という異なる機能間の対応付けを行う必要がある．一方，作業設計段階では，切削力・変位・振動などといった物理現象に関する記述を通じて両者の関連付けを行うことができることから，適切に把持方法と加工条件の相互関連を考慮した処理が行えると考えられる．

6.2.2　モジュラー型問題解決器の構成

工作物把持と加工条件の逐次的な決定に起因する問題を克服するためには，両者の決定を並列かつ整合的に行うことが必要である．しかし，全ての決定を一括して行うことは，問題の規模を考えれば定式化やモデル化の観点からも現実的ではない．そこで，本研究では，第 6.1 節での議論を踏まえて，整合的問題解決の枠組としてモジュラー型問題解決器を用いた問題解決を提案する．提案する問題解決器の概要を図 6.3 に示す．

提案する枠組は，大規模な作業設計問題に対して，分割された部分問題により求められた解の合成および評価と，部分問題としての個別的な解の修正を繰り返すことによって，全体の解の質を高めていくというものである．

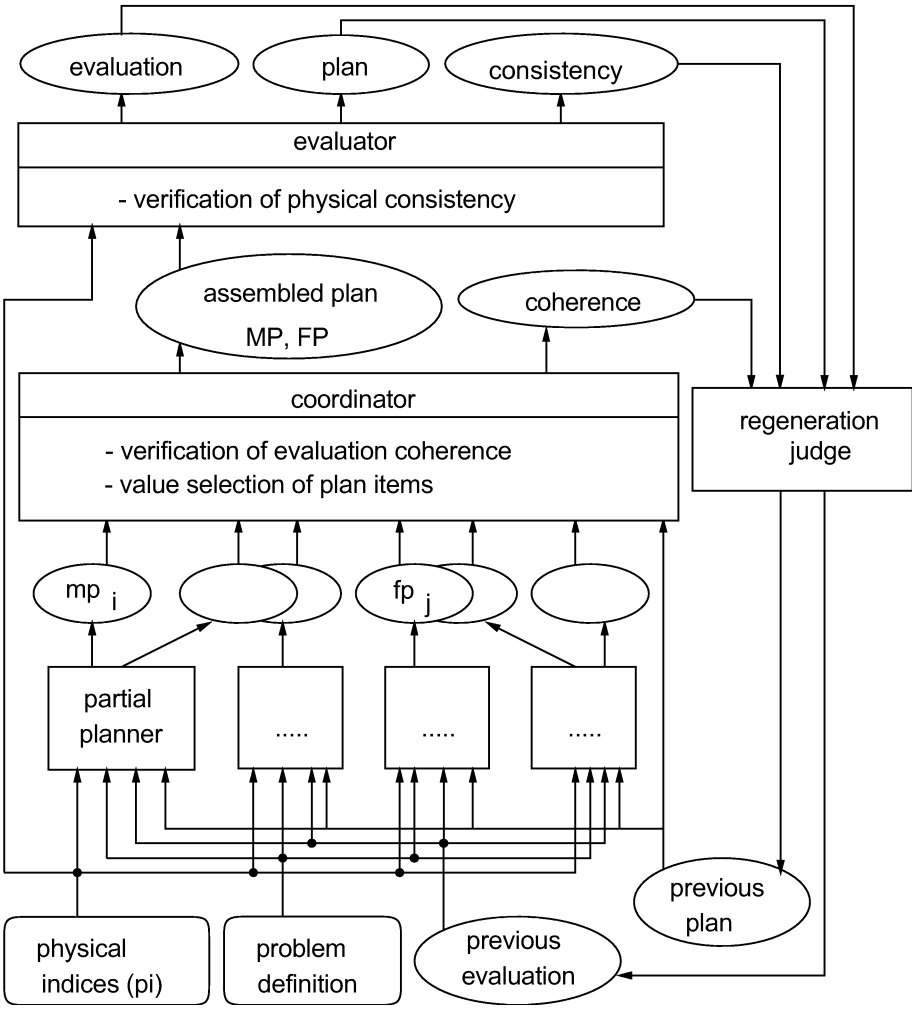


図 6.3 モジュラー型問題解決器の枠組

具体的には，まず，現在までに行われた決定結果を前提にして，個別的に部分問題から得られる断片的な解の決定を行う．これは，個別の解の修正案を生成していることに相当する．断片的な解を合成した後，合成された解に対して，全体としての評価を行う．評価が良好でなければ，この評価に基づいて個別的な再決定を行う．再決定は，全ての制約が満たされるまで続けられるが，明示的に満足化の条件を与えているので，不必要に部分問題解決器が評価値の改善を続けることはない．最適化過程が余裕の排除過程であるということを考えれば，不必要な解の改善は，計算時間の浪費のみならず，作成された計画の質の低下をもたらすことになる．提案する枠組みでは，前回の決定結果を参照して個別の決定を行うので，参照した計画が変更されていることにより，部分問題解決が無駄になる可能性は存在する．その場合は，次回の求解サイクルにおいて部分問題を再度解くことになる．本研究は，個々の部分問題解決を制約充足問題としているので，ある段階以降ではほとんどの決定項目は不変になり，このような事例は解が収束するにつれて少なくなると期待される．また，提案するシステムの構成要素としては，部分計画器，部分計画器で出された部分解の合成・調整を行う調整器，計画の評価器，収束判定器の 4 つの機能単位が必要である．

以下では，この問題解決の枠組を低剛性部品の加工における作業設計問題へ適用し，工作物把持方法と加工条件を整合的に生成した場合の効果について報告する．本システムによる作業設計案を作業者に提示することは，作業者に対する一貫した作業設計支援の第一歩であると言える．

6.2.3　工作物把持方法と加工条件の整合的生成問題

モジュラー型問題解決器による工作物把持方法と加工条件の整合的生成の例として，低剛性部品におけるポケット加工を取り上げる．今回対象とする例題の概要と被削材形状を図 6.4 と図 6.5 に示す．ここでは，工具と把持具は事前に決定されているものとし，図 6.4 に示す 6 つの決定項目に対して生成を行う．工具は ϕ 16 の 1 枚刃エンドミルとし，把持はバイスによる把持を行うこととした．今回対象とする例題は，工作物の剛性が低いため，過大な把持力によって工作物が変形する可能性がある．さらに，バイスの使用を前提としているので，Form Closure を満たすような幾何学的な制約によって工作物把持を実現することはできない．把持の位置および把持力と工具経路，加工条件を整合させて加工を行うことが不可欠な課題である．

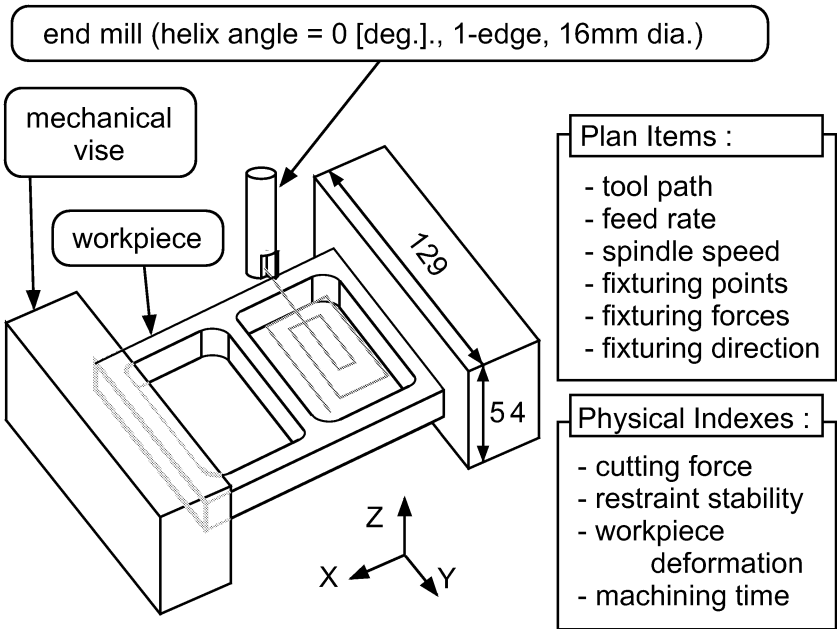


図 6.4 加工対象例

6.2.4　整合的生成の評価課題

図 6.6 に試作したモジュラー型問題解決器の構成を示す．開発したシステムは，以下の 3 つの部分問題に分割して解の導出を行う．個々の生成モジュールは，独自の問題解決アルゴリズムと評価因子を有しているが，参照情報を通じて相互に関連し合っている．

把持方法の生成 評価因子として把持の安定性と工作物変形を考慮して，工作物の把持方向，把

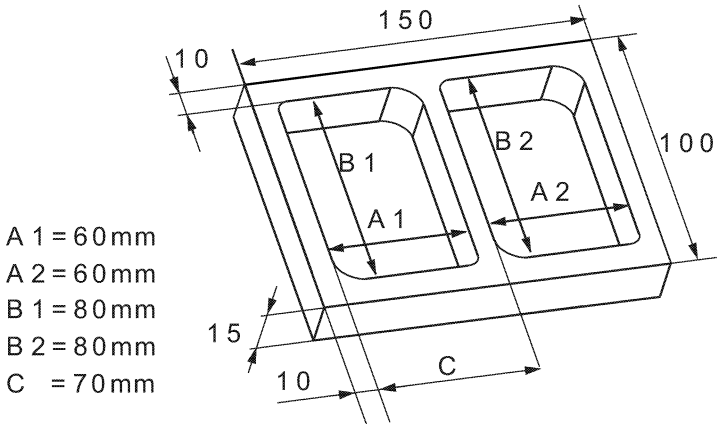


図 6.5 工作物形状

持位置，把持力を生成する．加工中に発生する切削力の予測値を参照情報として用いる．

加工パラメータの生成 最大切削力を評価因子として，送り速度と回転数を生成する．工具経路から導かれる切削深さと切削幅を参照情報として用いる．

工具経路の生成 加工時間を制約として，工具経路を生成する．送り速度を参照情報として用いる．工具経路パターンとして，スパイラルイン，スパイラルアウト，一方向（X 方向および Y 方向），往復（X 方向および Y 方向）を用意しておりそれぞれのパターンごとに経路生成を行う．

問題解決の手順は，まず，工作物把持方法，工具経路，加工条件について事前に用意されてた初期値を設定する．そして，部分解を合成した後，作業設計案全体としての評価を行なう．全体の評価にあたっては，(1) 加工時間，(2) 工作物変形，(3) 最大切削力，(4) 把持安定性，の 4 つの項目に対して評価を行う．評価結果にもとづき，再設計を行なうかどうを判断する．再設計を停止する判断基準として今回は，すべての制約が満足された場合と最大繰り返し回数を超えた場合の 2 つの条件を用いた．さらに，停止条件を満たさないまま再設計の候補が変化しなくなった場合には，収束判定器より参照関係をもとに他の部分問題解決器にも再設計を行うよう信号が送られる．再設計を行う場合には，すでに評価を行った作業設計案を参照しながら各部分問題解決器が独自に解を生成する．したがって，システムは，再設計の停止条件を満たすまで作業設計案の生成と評価のサイクルを繰り返す．なお，切削力の推定は，Kline の方法 [Kline 82] を用い，把持の安定性は把持力と切削力をもとにした静力学解析により評価した．また，工作物の変形解析は相当はりの変形により近似的に評価したが，境界条件を含めたデータの自動生成と計算時間の問題が克服できれば有限要素法の適用も可能である．

以上の問題解決手順からわかるように，解候補の生成と評価は独立しており，部分問題解決器および評価器は高いモジュール性を有している．このことは，機能拡張やノウハウの埋め込みを含むの作業者のカスタマイズが容易に行えるための必要条件である．

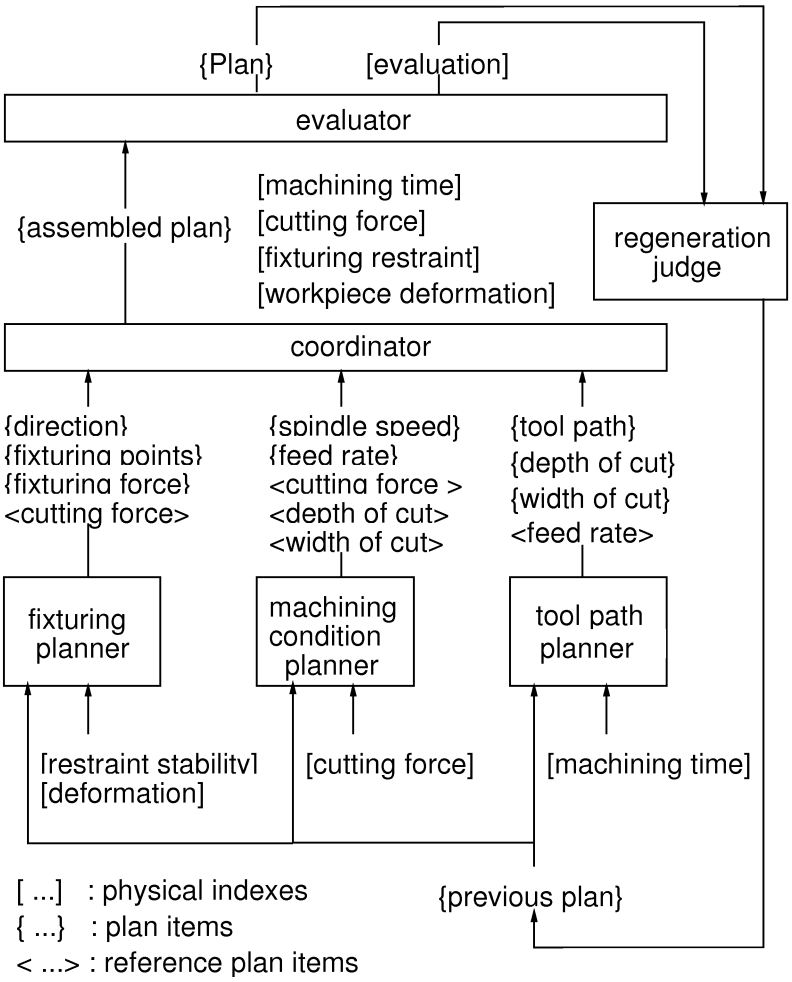


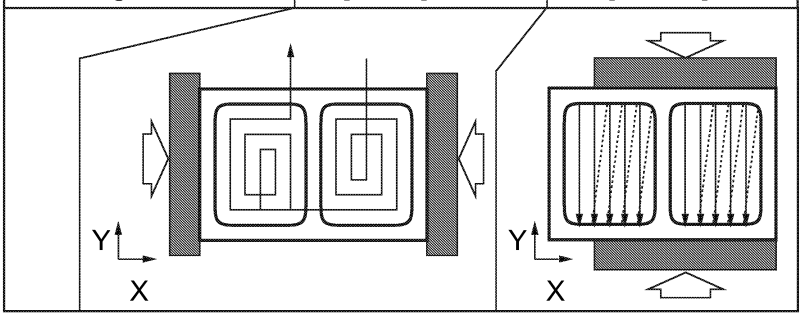
図 6.6 モジュラー型問題解決器を基にした整合的作業設計システムの構成

6.2.5 評価実験

本システムの有効性を評価するために，アルミニウムを被削材とした場合の切削に対する作業条件の比較を行った．第一の作業条件は，標準的な手法により生成されたもので，工作物の把持はバイスの最大把持力で把持することとし，加工条件は工具カタログの推奨値を用いた．また，工具経路については，ハンドブック等で推奨されている切削幅でのスパイラルアウト型の工具経路とした（以後これを初期プランと呼ぶ）．第二の作業条件は，本システムにより生成された作業条件で，工具経路パターンや把持方法なども初期プランとは異なる（以後これを生成プランと呼ぶ）．図 6.7 に初期プランと生成プランの概要と評価値を示す．生成プランでは，把持の安定性を損なうことなく把持力が抑制され，工作物変形が減少している．さらに，作業時間の改善も図られている．プランを分析してみると，生成プランでは工具移動方向を一方向にすることにより切削力方向のばらつきを抑えたことにより小さい把持力での加工を実現していることがわかる．

つづいて，初期プランと生成プランを用いた切削実験を行った場合の加工誤差を図 6.9 に示す．図 6.9 の A1，A2，B1，B2，C はそれぞれ図 6.5 の寸法の誤差を示す．初期プランでは，過

Plan items	Initial Plan	Generated Plan
tool path pattern	spiral out	unidirectional
width of cut	10.0 [mm]	4.0 [mm]
depth of cut	2.0 [mm]	7.5 [mm]
feed rate	0.025 [mm/tooth]	0.03 [mm/tooth]
spindle speed	1500[rpm]	1500[rpm]
fixturing direction	X	Y
fixturing forece	30000[N](Max)	5000[N]
fixturing area	Y=[0,100]	X=[21,150]



physical indices	Initial Plan	Generated Plan
(1)machining time	88.6[min]	51.0 [min]
(2)deformation	0.203[mm]	0.023[mm]
(3)cutting force[max]	178[N]	578[N]
(3)restraint stability	stable	stable

図 6.7 初期プランと生成プランの比較

大な把持力により大きな誤差が発生しているが，生成プランでは加工誤差が改善されている．

6.2.6 整合的作業設計の結果

本節では，作業設計案の生成手法として，工作物把持と加工条件の整合的生成を行う手法について検討を行った．一貫した作業条件の生成のために，モジュラー型問題解決器を提案し，その基本構成について述べた．また，低剛性部品の加工を例として，試作システムを作成した．評価実験を通じて，本手法によって得られる，把持の安定性，加工時間，加工精度を考慮した作業条件が有効であることを示した．

6.3 作業支援システムの再構成

第 3 章でも述べたとおり，変動する状況の下で継続的なシステムの利用を行うためには，作業者自身による支援システムの再構成が不可欠である．これは，設計者の視点（System View）と利用者の視点（Personal View）[Norman 92] の両者を作業者が認識することが可能となり，ユーザビリティの面からも，システム理解の促進という効果も期待できる．

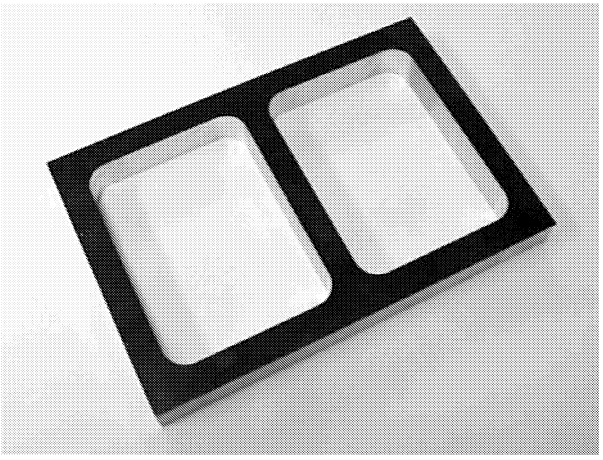


図 6.8 加工後の工作物

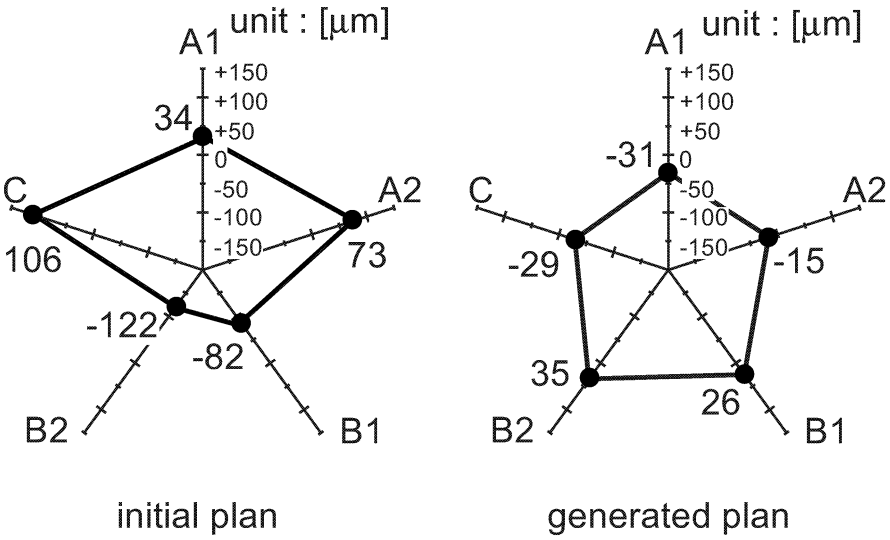


図 6.9 加工誤差評価実験の結果

6.3.1　加工準備段階での作業支援

前節で，作業設計の整合的な決定について議論したが，以下では，このような作業設計システムを作業者が再構成する手法について検討する．

まず，どのような点に対する作業設計システムの再構成が必要であるかを明らかにするために，作業者支援の枠組みについて整理する．加工における意思決定支援は，作業者の作成した作業計画の事前評価を与える Evaluative Decision Support (EDS) と作業計画の作成そのものを支援する Generative Decision Support (GDS) に大別できる [Kidd 92]．EDS の代表的なものとしては，加工シミュレーションなどの NC プログラムの事前評価システムがある．また，GDS に関連するものとしては，CAM などの作業設計システムを挙げることができるが，従来の作業設計システムの多くは自動作業設計を目指しており，作業者の支援システムとして見た

場合課題が残されている．

作業設計と加工シミュレーションの関連としては，物理シミュレーションによる作業性の評価や加工精度やびびり現象といったシミュレーション結果を基にした作業設計が行われてきた [Tsai 91]．これらの手法では実装したシミュレーションが対象とする加工プロセスの支配的な物理現象である場合には，良好な作業計画が期待できる．しかしながら，繰り返し性の低い加工プロセスの場合，どのような物理現象が支配的であるかは事前に規定することは難しい．このような不確かな状況において，熟練作業者は過去の経験を基に状況の理解を行い問題の規定と問題解決を行っている．通常の作業者がこのような技能と同等な能力を発揮できるように計算機で支援するためには，

- 個々の状況において支配的な物理現象を判断できる，
- 状況に応じて評価に用いる物理現象を変更できる，

の 2 つの機能が少なくとも必要となる．

これらの機能のうち，前者の機能にについては，先見的な知識が無い場合，事前に想定可能な全ての物理現象に対する評価を実施することが必要となり，計算時間の問題のみならず，シミュレーションのための様々な物理パラメータの収集が必要となり現実的には困難である．むしろ，作業者が作業支援環境を使用しながら作業遂行を重ねるうちに加工作業に対する経験的な特徴抽出を行うようなポストプロセス処理との連携により解決すべきであると考えられる．そこで，以下では，作業者が作業設計システムと加工シミュレータをカスタマイズしながら問題解決する手法について検討する．

第 6.1 節でも指摘したように，これまでに数多く行われてきた作業設計研究では，作業設計を行う際に考慮する物理現象や作業設計項目が固定的に取り扱われてきた．このような作業設計システムにおいては，作業設計システム構築時に作業状況が暗黙的に限定されていることが多く，システム構築時に想定されていない作業状況におけるシステムの利用が困難な場合が多い．しかしながら，本研究で対象とする小ロット・複雑形状部品の機械加工では，評価尺度の多様な設定とそれに応じた作業設計手法の使いわけが重要となる．そこで，以下では，作業者が作業状況に応じて柔軟に作業設計システムを再構成するための手法について検討を行う．

6.3.2 作業状況の変化を考慮した作業設計システムの再構成

作業設計において，満たすべき作業仕様は問題解決における制約条件や評価関数といった評価尺度として表現される．従って，第 6.1 節で示したように，作業状況の変化を考慮した作業設計システムの再構成を行うためには，評価尺度の変更を容易に行えるシステムを構築することが必要となる．

評価尺度の変更を行うためには，評価尺度の評価手続きの更新と，変更された評価尺度に応じた問題解決器の再構築が課題となる．前者の課題に関しては，事前に作業計画の評価を行うソフトウェアを蓄積した評価器リポジトリを構築し，ユーザが選択的に評価器を利用できる機構を構築することにより実現する．後者の課題に対しては，評価尺度の変更の影響を局所化できる構造の作業設計カーネルを構築することにより解決できる．前節で示したモジュラー型問

題解決器（Modularized Problem Solver : MPS）はこの条件を満たしており，以下では，モジュラー型問題解決器の再構成について示す．

図 6.10 に再構成可能なように拡張されたモジュラー型問題解決器を示す．ここに示した枠組みは，断片的な作業設計モジュール群を，作業者が適宜使分けることにより，多様な状況に対して問題解決を行うものである．

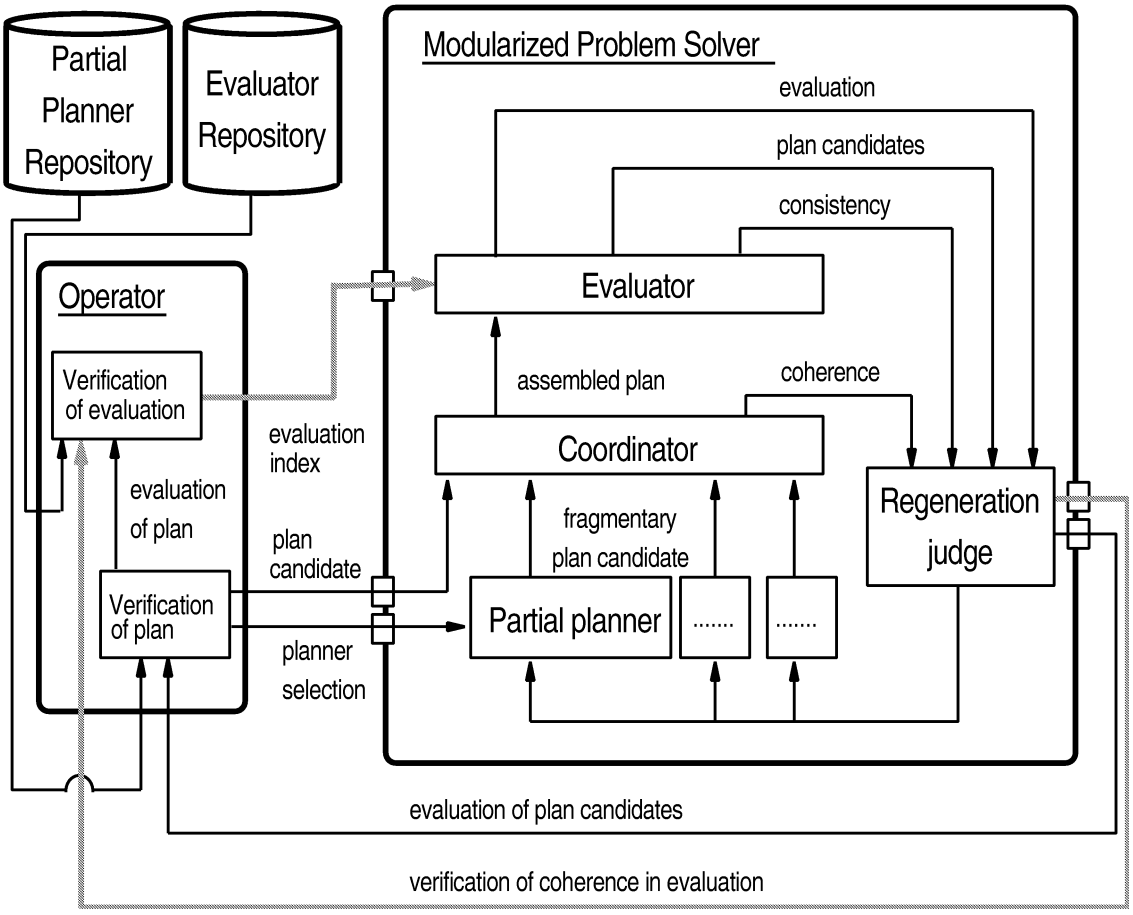


図 6.10 MPS の拡張

6.3.3　作業設計システムとシミュレータのカスタマイズ

前節の枠組みを基に，モジュラー型問題解決器に基づく作業設計システムに対して，作業状況の変化に応じてシステムを系統的に再構成するための手順について検討した．図 6.11 に拡張したシステム構成を示す．この構成において，以下の手順で作業設計が行われる．

1. 評価リポジトリよりシミュレーションのためのモジュールを選択し，作業設計における評価モジュールを構築する．
2. 作業設計モジュールリポジトリから作業設計を行うためのモジュールを選択し，評価モジュールを含めて作業設計システムを構築する．
3. 構築した作業設計システムを用いて作業設計案の導出を行う．
4. 作業設計評価のための加工シミュレーションを構築し，加工の事前評価を行う．

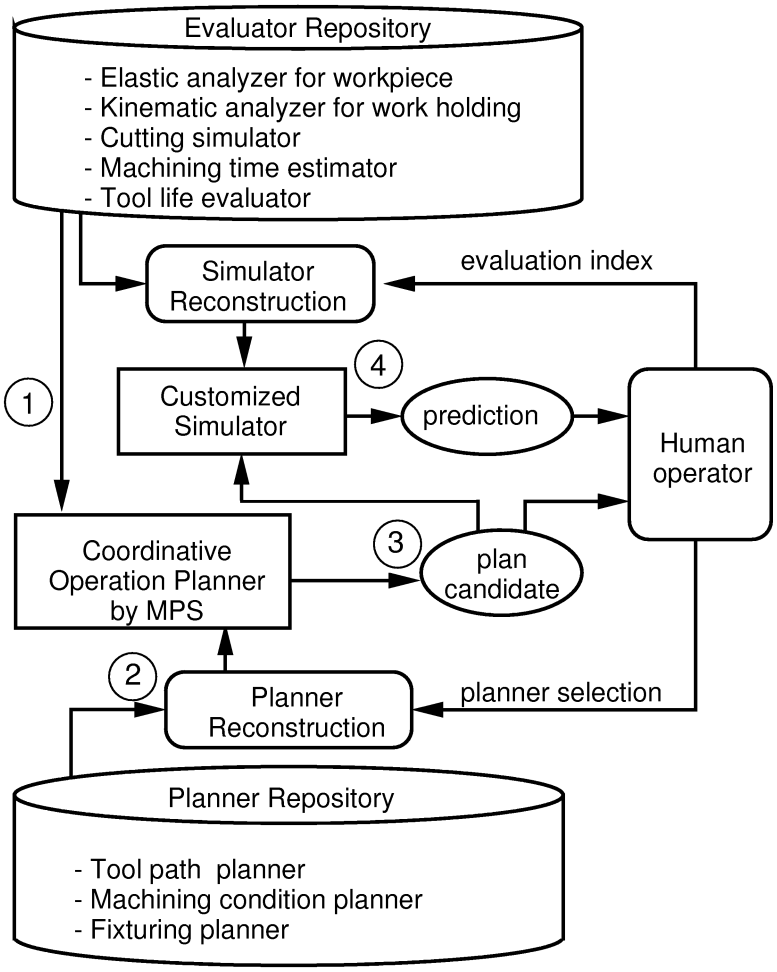


図 6.11 作業設計システムの再構成

以上の手順により，作業者は自らが設定した評価尺度に基づいた作業設計案を得ることができるだけでなく，作業計画の立案時には計算量の観点から適用が困難な加工シミュレーションも，ある程度作業計画が収束しつつある段階では適用可能になると考えられる．そして，このような精緻な事前評価を用いることにより加工時のトラブルを回避したり，加工のリハーサルを行うことができる．従って，このような枠組での作業設計は，多様な状況に適応した作業設計の決定が容易に行えることが期待できる．

6.3.4 試作システムの構成

図 6.12 に，作業者による評価尺度の変更に適応して再構成可能な作業設計システムとして開発したシステムの構成を示す．このシステムは，工作把持・工具経路・加工条件を生成するモジュールを有する MPS を基にした問題解決カーネルと，作業設計における評価尺度を作業者が選択するための評価器リポジトリからなる．再構成の手順は以下の通りである．

1. 評価器リポジトリより評価器を選択・合成する．

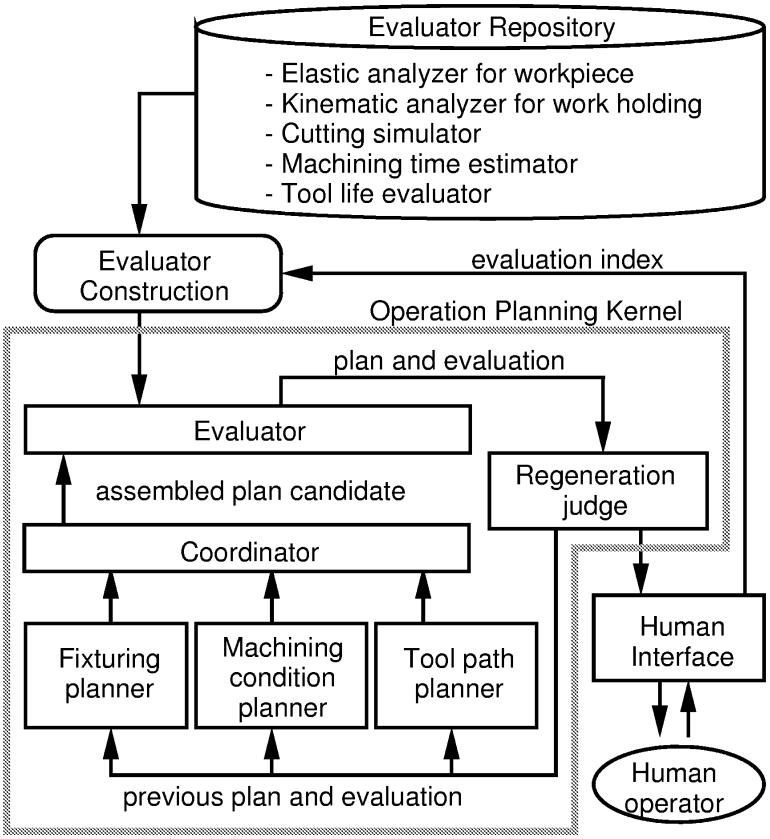


図 6.12 再構成可能な作業設計システムの構成

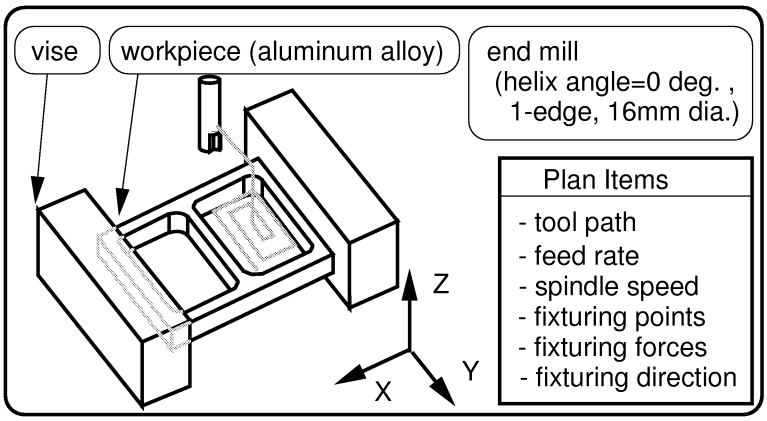
2. 個々の作業設計モジュールと評価器の対応付けを行う．
3. 作業設計問題の個別条件を入力して解を求める．

現在のシステムでは，評価器の再構成は手動で行っているが，個々のモジュールの入出力に関して形式的な記述を行うことにより自動化は可能である．試作システムは，作業設計システムの再構成を，評価モジュールの選択・合成と，断片的な作業設計モジュールとの関連付けという２つの形式的な手続きに分解して実現したと解釈できる．このようなシステムにより，作業設計における評価尺度の変更が容易に行えると考えられる．

6.3.5　例題

プロトタイプシステムを用いて，図 6.13 のような低剛性部品の加工を例に，作業設計システムの再構成を行った．まず，図中の評価尺度 (A) に対する作業設計システムを構築し，作業設計を行った．続いて，評価尺度 (B) に対して適応できるように作業設計システムを再構築して作業設計を行った．評価尺度 (B) では，新たに工具寿命に関する評価尺度が導入されているため，通常の作業設計システムでは，事前に可能な限りの評価尺度を想定したシステムを構築する以外このような事例には対処できない．しかしながら，前節で示した手順で再構築した作業設計システムにより，新たな評価尺度に対応した作業設計を行うことができた．生成されたプ

ラン及びその評価をそれぞれ図 6.14 および図 6.15 に示す.



Evaluation Indexes	(A)	(B)
cutting force	< 1000 [N]	< 1000 [N]
machining time	< 90[min]	< 80 [min]
deformation	< 0.03 [mm]	< 0.1 [mm]
restraint stability	stable	stable
tool life for 10 parts machining	not considered	possible

図 6.13 作業設計システム再構成の例題

6.4 作業設計支援のまとめ

本章では，加工準備段階における作業支援として，分散制約充足問題の枠組みをもとにした問題解決の枠組みを示し，整合的な作業設計手法について示した．そして，作業者によってカスタマイズ可能な作業設計システムにより多様な状況において作業者を支援する枠組を示した．低剛性部品の加工を例に提案した手法が良好な作業計画案を作成できることと，系統的なシステム再構成が行えることを示した．

今後，より高精度な加工に取り組むためには，工具摩耗の影響，切削力および切削熱による工作物の変形，びびり解析などを考慮する必要がある．また，これらの課題を克服することに加え，システムの再構成に当たって，現在はソースレベルでのソフトウェア編集が必要であるので，シミュレーションおよび作業設計システムを構成するモジュールを適切なミドルウエア群として構築し，容易に再構成が行えるようにすることも今後の課題である．

	evaluation (A)	evaluation (B)
tool path pattern	unidirectional	spiral out
width of cut	4.0 [mm]	10.0 [mm]
depth of cut	7.5 [mm]	3.0 [mm]
spindle speed	1500 [rpm]	1500 [rpm]
feed rate	0.03 [mm/tooth]	0.05 [mm/tooth]
fixturing direction	Y	X
fixturing force	5000[N]	14000[N]
fixturing area	X = [21,150]	Y = [0,100]

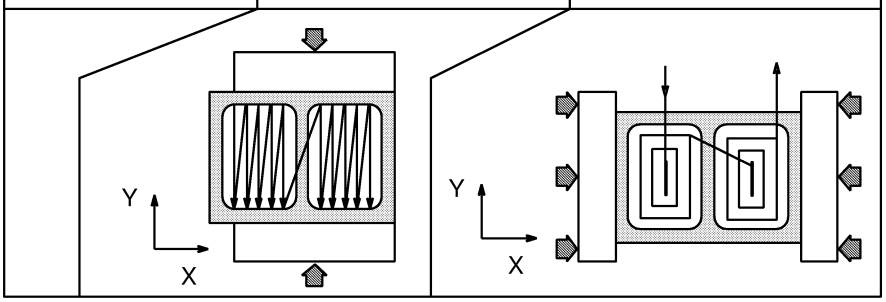


図 6.14 生成されたプラン

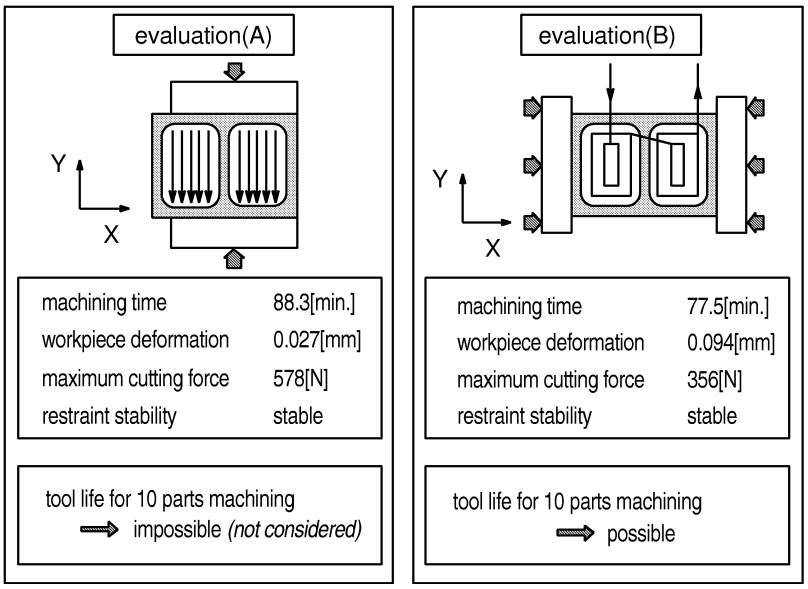


図 6.15 生成されたプランの評価

参考文献

[石田 96] 石田 亨，片桐 恭弘，桑原 和弘，”分散人工知能”，コロナ社，(1996)

[Iwata 89] Iwata, K. and Fukuda, Y., 1989, ”KAPPS: Know-How and Knowledge Assisted Production Planning System in the Machine Shop”, Manufacturing Systems, Vol.18, No.2 : 131-139

[井原 98] 井原 透，松村 隆，伊東 誼，”工程設計における技術者思考モデルの同定支援システム”，精密工学会誌，Vol.64，No.1，pp.111-115(1998)

[Hayes 91] F. Hayes-Roth，寺野 隆雄 訳，エキスパートシステム，人工知能大辞典，丸善株式会社，pp.84-94(1991)

[寺本 97] 寺本 孝司，岩田 一明，”モデルベースシステム構築のためのシミュレーションモジュール・リポジトリの構成に関する研究”，1997 年度精密工学会春季大会学術講演論文集，pp.967-968(1997)

[Kline 82] Kline, W.A., DeVor, R.E. and Lindberg, J.R., The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application of Cornering Cuts, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.22, No. 1,pp.7-22(1982)

[Ong 94a] Ong, S. K. and Nee, Y. C., ”Set-up Planning: A Pre-Planning Process for CAPP and CAFP” , Advancement of Intelligent Production, E. Usui(ed.), Elsevier,pp.112-119(1994)

[Kidd 92] P.T. Kidd, ”On the Design of Skill Supporting Conputer-aided Technologies”, IFAC Automated System Based on Human SKill (and Intelligence), (1992)

[Tsai 91] Tsai, M. D. and Takata, S., 1991, ”Operation Planning Based on Cutting Process Models”, Annals of the CIRP, Vol.40, No.1 pp.95-98(1991)

[Norman 92] D. ノーマン，”認知的な人工物”，安西祐一郎ほか（編），認知科学ハンドブック共立出版, pp.52-64(1992)

第7章　結論および今後の展望

7.1　本論文の結論

本研究は，小ロットでの高精度なエンドミル加工の実現を目的に，NC 工作機械を操作する作業者の適応的作業遂行を支援するための枠組みの提案と提案した枠組みを実現するための基盤技術に対する基礎的な検討を行った．以下に本研究で得られた結論を示す．

第 2 章では，これまでに行われた熟練技能に対する調査結果を検討することにより，状況の変化へ対応できる作業遂行が求められていることを指摘した．そして，既存の加工研究の問題点として，暗黙的な作業遂行過程に対する仮説のもとでの断片的な手法の開発を行っていることを指摘した．さらに，加工経験の量的不足や加工要求の高度化といった作業者を取り巻く社会的環境変化への対応が不可欠であることを明らかにした．

第 3 章では，適応的作業遂行を行うに当たっての問題点について，加工ワークステーションにおける作業者の役割に対する分析を基に整理した．そして，作業遂行支援において必要となる機能として，加工準備段階での高精度な加工状態予測，一貫した作業設計案を策定する整合的作業設計手法，作業状態の高精度推定，システムの再構成支援，の 4 つがあることを指摘した．そして，これらの機能を踏まえた作業遂行の枠組みを提案した．

第 4 章では，高精度な加工状態の事前予測のために，断片的な予測結果を関連付けることを目的とした多相的加工プロセス表現を提案した．さらに，従来，研究対象として取り扱われることの少なかったボールエンドミル加工における切削力シミュレーションシステムを開発した．さらに，プロセスモデルの学習により信頼性の高い加工予測が行えることを示した．

第 5 章では，作業者への作業状態提示のための枠組みと高精度推定の手法について検討した．工作物の熱伝導問題を例に，プロセスモデルに含まれるパラメータのばらつきのもとでも高精度な状態推定を行う手法として，シミュレーションと計測情報を併用した加工状態推定手法を提案した．提案した状態推定により直接知覚できない情報を作業者に提示することが可能となり，作業者が加工状況を的確に認識できることが期待できる．

第 6 章では，従来個別に取り扱われてきた工作物把持方法の決定と加工条件の決定を，協調的に生成する手法として分散問題解決手法を基にした作業設計手法を提案した．そして，低剛性材料の加工を例に，試作したシステムによる作業設計案の評価を行い，城来の作業設計に比べて精度の向上が期待できることが分かった．さらに，作業設計システムの再構築のための枠組みを示し，系統的な作業設計システムの再構築を可能とした．

以上の技術的検討結果より，本研究の提案する作業遂行支援の枠組みは実現可能であり，個々の機能レベルでは一定の支援効果が期待できることが明らかになった．

7.2　今後の研究課題

本研究の目的を実現するために不可欠なもののなかで，本論文では検討がなされていない研究課題が残されている．それらのうち代表的なものを以下に述べる．

対象の大規模化・複雑化に対応できる処理の高速化　今回対象とした例題は，比較的小規模な課題が多い．原理的には現実の作業へ適用することは可能であるものの，問題が大規模なものとなるとシミュレーション時間が実用上の問題となることが考えられる．さらに，複雑な現象を取り扱う場合には，多様な物理現象に対する大量の経験的知識やモデルの蓄積も不可欠となる．この点については，実世界情報の系統的なデジタイズ手法の検討と，知識共有手法やデータマイニング手法の適用に対する検討が必要である．

一体としたシステムの構築と具体的作業遂行下での評価　一般に，何らかの道具が作業環境に導入されることにより，作業構造もまた変化することになる．本研究はそのような変化を少なくすることを目指して，人間－機械系としての必要機能の観点からの課題設定を行った．しかしながら，最終的な評価は実際の作業遂行への適用をもって行う必要がある．さらに，長期的な観点から本研究の提案する枠組みが作業者の機械操作技能の向上に寄与するかどうかの検証も必要となる．したがって，作業遂行を実際に支援するためのインタフェース設計を含めて，個々の要素技術を結合した一貫した作業支援システムを実装した後，作業遂行における支援の効果について検討する必要があると考えられる．

支援システム導入に対する心理・社会的側面からの評価　今回は，作業遂行における技術的な側面からの議論以外は行っていない．このようなシステムが有効に機能するためにはシステムの運用に関わる組織的・心理的な影響も含めて検討を行う必要がある．さらに，適応的作業遂行による小ロットの高精度加工が製品製造の潮流の中で，どのように位置付けられるのかという側面についても，実証的な評価が必要である．

7.3 展望

今後，本研究に対する研究課題が克服され，作業者が適応的に作業を遂行するための支援技術が実現されることにより，作業遂行における技能レベルが向上することが本研究にとってのひとつのゴールである．最後にこのゴールの先にある事柄について展望を述べる．

本研究が提供しようとする作業支援のためのシステムは，作業者によってカスタマイズされながら作業遂行を容易にするという意味では，支援システムや協調すべき独立したエージェントというよりは，メディアもしくは道具であると言える．このような作業遂行時に用いられた作業環境の履歴を解析することにより，あたかも考古学者が古代の土器から生活様式を推測するように，作業遂行時に何を問題として捉えたのかという問題解決以前の問題認識様式を推測できる可能性があると考えている．既存の多くの研究は，何らかの問題が与えられた時に解決手法を提示することに関しては極めて豊富な成果を有する．しかしながら，なにを解決すべきなのか？どのような問題を設定すべきなのか？という問題規定に関する問いに関しては十分な回答が存在しない．作業者が熟練していくに従って，どのような環境の整備を行ったかに関する情報は，能力に応じた問題規定の状況証拠を提供すると考えられる．

そして，このような状況証拠の積み重ねは，環境や道具の整備により作業を行い易くする能力に注目した作業者の技能のモデル化へとつながると期待できる．特に，道具の導入による作

業の変換，行為における自由度の拘束，物理的制約の利用といった点に注目した分析は，従来の問題解決過程としての作業者のモデルではなく，自らの行為の帰結として得られる物理世界での変化や制約を踏まえて作業問題を設定する総合的な作業遂行能力に対するモデルを提供できると期待される．このようなモデルはまさに，*homo faber* としての人間のモデルであり，人間の熟練研究に対しても大きな貢献ができると考えられる．

謝辞

本論文の執筆を勧めていただき，主査をお引き受けいただいた大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻 竹内 芳美教授に心より感謝の意を表します.

副査をお引き受けいただき，本論文に有益な助言をいただきました大阪大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 三好 隆志教授，電子制御機械工学専攻 藤田 喜久雄教授に深く感謝いたします.

本学在任中，本論文に対して校閲をしていただき，有益な助言をいただきました大阪大学 花崎 伸作名誉教授に深く感謝いたします.

日々の研究生活において，論理的な思考の重要性を身をもって示され，遅々として進まない私の研究を励ましていただいた北海道大学 小野里 雅彦 教授に深く感謝いたします.

本研究を進めるにあたり，人間のもつ技能というチャレンジングな領域の研究の重要性を指摘するとともに，広い視野で研究を捉えて適切な助言を賜りました大阪大学 岩田 一明名誉教授に深く感謝いたします.

学会活動を含め，有意義な議論と激励を賜りました，神戸大学 白瀬 敬一教授に心から感謝いたします.

また，著者が所属する研究室に在籍された，早稲田大学 高田 祥三教授，立命館大学 平井 慎一教授には本研究の初期段階で多くの助言を賜りました．ここに深く感謝いたします.

同じ研究室に所属していた研究者として，有意義な議論と学位執筆の激励をいただいた，産業技術大学 小池 稔先生，大阪府立大学 谷水 義隆先生，大阪大学 若松 栄史先生に感謝いたします.

人間の持つ技能について多くの刺激的な議論をさせていただいた国際高等研究所 スキルの科学に関する学際的検討研究会のみなさまに感謝いたします.

エンドミル加工に関する研究を共同で行った大阪大学大学院工学研究科生産システム学領域の卒業生諸君に感謝いたします．特に，金子 順一君および西田 陽亮君との議論は本研究の遂行にあたって非常に有益なものでした.

最後に，家族への感謝をもって本論文を結びます.

本論文に関連する発表論文

- Teramoto, K. and Onosato, M., Configuration of Task Support Environment for the Enhancement of Machining Skills , Proceedings of the 35th International Seminar on Manufacturing Systems, pp.492-497(2002)【第 3 章】
- Teramoto, K., Iwata, K., and Hirai, S., Development of Learning System with Process Model Selection for Control of Ball-end Milling, Advancement of Intelligent Production, *E. Usui(ed.)*, Elsevier, pp.461-466(1994)【第 4 章】
- 寺本孝司，小野里雅彦，モデル学習によるボールエンドミル加工の高精度切削力予測，精密工学会誌，Vol.69, No.8, pp.1098-1103(2003)【第 4 章】
- Teramoto, K. and Onosato, M., In-Process visualization of machining state with sensor-based simulation to support the recognition ability of operators, Human Friendly Mechatronics —Selected Papers of the International Conference on Machine Automation—, Elsevier, pp.389-394(2001)【第 5 章】
- Teramoto, K., Nishida, Y. and Onosato, M., Adaptive estimation of thermal state for machining state visualization, Proceedings of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Vol. II, pp. 943-946(2002)【第 5 章】
- Teramoto, K., Onosato, M., and Iwata, K., Coordinative generation of machining and fixturing plans by a modularized problem solver, Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 437-440(1998)【第 6 章】
- Teramoto, K. and Onosato, M., Coordinative Operation Planning for Preliminary Evolution of Machinability, Proceedings of 2nd International Workshop on Strategic Knowledge and Concept Formation (SKW'99), pp. 281-289(1999)【第 6 章】
- Teramoto, K., Onosato, M., and Iwata, K., A Framework of Human-Computer Collaboration for Situation Conscious Operation Planning, CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol.31, No.3, pp.235-240(2002) 【第 6 章】
- 寺本孝司，小野里雅彦，エンドミル加工における整合的作業設計，日本機械学会論文集 C 編，Vol.70，No.694，pp.1824-1829（2004）【第 6 章】