

377.5

K-11-2

1-84

Boundary-Map 形状モデルに基づく高速 高精度加工システムの開発に関する研究



九州工業大学附属図書館



0010459311

平成 13 年 3 月

藤尾 三紀夫

目次

第1章 緒論 1

- 1. 1 本研究の背景と目的 2
 - 1. 1. 1 本研究の背景 2
 - 1. 1. 2 本研究の目的 5
- 1. 2 本論文の概要 6

第2章 高速高精度加工に関する

従来の研究と問題点 9

- 2. 1 高速高精度加工の問題点と誤差要因 10
- 2. 2 CAD/CAMシステムに関する従来の研究と問題点 13
 - 2. 2. 1 CAD/CAMシステム間の形状モデル 13
 - 2. 2. 2 CAMシステムにおける工具経路生成 13
 - (1) NCプログラムの表現能力の問題 13
 - (2) CAMシステムの処理時間の問題 15
 - (3) 高速加工に対応した工具経路の生成手法の問題 15
 - 2. 2. 3 NC加工シミュレーション 15
- 2. 3 CNC装置に関する従来の研究と問題点 17
 - 2. 3. 1 補間と加減速処理 17
 - 2. 3. 2 サーボの追従誤差 21
- 2. 4 工作機械と加工中の誤差に関する従来の研究と問題点 23
 - 2. 4. 1 工作機械の誤差に関する従来の研究と問題点 23
 - (1) 主軸の振動と熱変形 23
 - (2) 摩擦によるスティックモーション 23
 - (3) 組み立て誤差と姿勢変形 24
 - (4) 熱変形 24
 - 2. 4. 2 加工中の誤差に関する従来の研究と問題点 25
 - (1) 工具の切削力による熱とたわみ変形 25
 - (2) 工具の切削力による振動 26
 - (3) 工具の摩耗 26

参考文献	28
------------	----

第3章 Boundary-Map 形状モデルの開発..... 32

3. 1 はじめに	33
3. 2 ソリッドモデル	35
3. 2. 1 CSGとB-Rep s	35
3. 2. 2 空間格子モデル	37
3. 3 Boundary-Map 形状モデルの概念とデータ構造.....	41
3. 3. 1 Boundary-Map 形状モデルの概念	41
3. 3. 2 Boundary-Map 形状モデルのデータ構造	42
3. 4 Boundary-Map 形状モデルの表現精度.....	45
3. 4. 1 Boundary-Map 形状モデルの表現精度とメモリ容量	45
3. 4. 2 格子間隔と表現精度	46
3. 5 Boundary-Map 形状モデルのデータ圧縮.....	48
3. 5. 1 圧縮手法	48
3. 5. 2 圧縮によるメモリ容量比較	49
3. 6 総括と結論	51
参考文献	53

第4章 Boundary-Map 形状モデルに基づく

CAD/CAMシステムの開発..... 55

4. 1 はじめに	56
4. 2 CADシステムの構成	58
4. 3 プリミティブ形状の生成.....	60
4. 3. 1 プリミティブ形状の定義	60
4. 3. 2 オブジェクト座標とワールド座標	61
4. 3. 3 プリミティブ形状のBoundary-Map 形状モデル変換	64
4. 4. NURBS形状の生成.....	68
4. 4. 1 NURBS曲面の定義	68
4. 4. 2 NURBS曲面のBoundary-Map 形状モデル変換	69

8	4. 5	形状編集・表示処理	71
	4. 5. 1	セットオペレーション	71
12	4. 5. 2	スイープオペレーション	73
	4. 5. 3	レンダリングオペレーション	74
	4. 6	工具経路生成の概念	75
33	4. 6. 1	工具フレームとワークフレーム	75
35	4. 6. 2	工具経路生成の概念	76
35	4. 7	接触位置の探索	78
37	4. 7. 1	干渉チェック	78
41	4. 7. 2	次点探索	79
41	4. 7. 3	CAMシステムの構成	81
2	4. 8	等高線工具経路の生成と加工実験	83
5	4. 8. 1	等高線工具経路生成の概念	83
5	4. 8. 2	等高線工具経路の加工実験	85
	4. 9	走査線工具経路の生成と加工実験	87
	4. 9. 1	走査線工具経路生成の概念	87
	4. 9. 2	走査線工具経路の加工実験	88
	4. 10	総括と結論	90
		参考文献	93

第5章 Boundary-Map 形状モデルに基づく

高能率荒取り加工システムの開発 94

	5. 1	はじめに	95
	5. 2	加工前穴加工用工具経路の生成	99
	5. 2. 1	形状急変部の検出と工具経路の生成	99
	5. 2. 2	加工前穴加工用工具経路生成例	100
	5. 3	長手方向切削に基づく工具経路の生成	102
	5. 3. 1	長手方向切削用加工領域の分割	102
	5. 3. 2	加工領域における工具経路生成	103
	5. 4	加工実験と評価	105
	5. 4. 1	加工実験	105
	5. 4. 2	汎用システムとの比較	108

5. 5 総括と結論	110
参考文献	112

第6章 Boundary-Map 形状モデルに基づく高速 高精度NC加工シミュレーションの開発 113

6. 1 はじめに	114
6. 2 NC加工シミュレーション	116
6. 3 NC加工シミュレーションの概念	119
6. 3. 1 形状除去処理	120
6. 3. 2 NC加工シミュレーションと除去量の算出	123
6. 4 NC加工シミュレーション結果と評価	126
6. 4. 1 NC加工シミュレーション結果	126
6. 4. 2 NC加工シミュレーションの比較	128
(1) NC加工シミュレーション後の形状精度	128
(2) NC加工シミュレーションに要する処理時間	130
(3) 干渉チェックの精度	133
6. 5 エアカット工具経路の除去	135
6. 5. 1 エアカット工具経路除去の概念	135
6. 5. 2 エアカット工具経路除去アルゴリズム	136
(1) 非切削領域の探索	136
(2) 非切削領域の工具経路編集	137
6. 5. 3 エアカット工具経路の除去結果	138
6. 6 高精度NC加工シミュレーションシステムの構成	141
6. 7 運動誤差を考慮したNC加工シミュレーション	143
6. 7. 1 運動誤差モデル	143
6. 7. 2 運動誤差の適用	143
6. 7. 3 運動誤差のNC加工シミュレーション結果	144
6. 8 工具のたわみを考慮したNC加工シミュレーション	148
6. 8. 1 工具のたわみモデル	148
6. 8. 2 工具のたわみの適用	149
(1) 一回転一刀当たりの送り量の算出	149
(2) 一回転一刀当たりの除去体積の算出	149
(3) たわみによる工具の形状変形と除去処理	151
6. 8. 3 工具のたわみのNC加工シミュレーション結果	154

6. 9 総括と結論	156
参考文献	158

第7章 Boundary-Map 形状モデルに基づく 高精度加工システムの開発 159

7. 1 はじめに	160
7. 2 Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムの概念 ..	162
7. 3 Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムの試作 ..	166
7. 4 形状補間	168
7. 4. 1 形状補間の概念	168
7. 4. 2 形状補間の出力結果	170
7. 5 形状補間とサーボデータによる運動誤差補正	173
7. 5. 1 運動誤差の補正	173
7. 5. 2 運動誤差補正の結果	174
7. 6 総括と結論	179
参考文献	181

第8章 結 論	182
謝 辞	190

第 1 章

緒 論

1.1 本研究の背景と目的

1.1.1 本研究の背景

近年、消費者の製品に対する要求は多様化および個性化し、製品寿命が短縮する傾向が続いている。その一方で、それぞれの製品には、高い品質と高い付加価値が要求されると共に、低価格が要求されている。このような消費者の要求を満たすためには、「開発コストの削減」「製品競争力の増強」「コストパフォーマンスの向上」「工数削減」「設計品質の向上」「納期の短縮化」などの課題を満たす必要がある。

消費者の要求を満たすための課題を解決するため、工業製品の開発、設計、製造などの工程ではさまざまな取り組みが実施されている。代表的な取り組みとしては、3次元ソリッドモデルをベースに製品の設計開発、解析から組み立て、製造までの各行程における情報を管理すると共にデータの共有を図る手法や、CALS(Continuous Acquisition and Lifecycle SupportまたはCommerce at Light Speed, 生産・調達運用支援情報)システム、PDM(Production Data Management: 製品情報管理)システムの導入によるシステムの情報マネジメントの効率化などが挙げられる。また、製造における加工行程においては、加工時間の短縮を実現するため、高速送りに対応した効率の良い工具経路を高速に生成すると共に、加工を高速に、そして高精度に行う高速高精度加工技術が研究開発されている。

これらの新しい技術の研究背景には、コンピュータの発展と情報技術(Information Technology)の発展によるところが大きく、インターネットを介して、企業間、業界間そして国家間の垣根が取り払われ、新しい技術の応用範囲は急速に拡大しようとしている。

特に、コンピュータと情報技術の発展は、設計、製造行程におけるCADシステム(Computer Aided Design)やCAM(Computer Aided Manufacturing)システムの機能向上、CNC(Computer Numerical Control)工作機械の高速高精度加工の実現に大きく貢献した。

CADシステムは、製品形状の設計はもとより、部品の標準化や加工データの再利用による設計や作図作業の効率化、過去のデータの蓄積、解析などを行うシステムである。近年のコンピュータと情報技術、そして可視化技術の向上により、これらの作業を高速に、そしてインタラクティブに実行することが容易になった。また、CADシステムが扱う形状データのソリッド化が進み、CAE(Computer Aided Engineering)技術の向上に伴って、数値解析による設計結果のシミュレーションや検査だけではなく、上位の設計過程から下位の加工、組み立て行程までを解析、模倣する仮想工場(Virtual Factory)技術が実現しつつある。

CAMシステムは、CADシステムによって設計された製品形状あるいは図面に基づいて、その製造準備作業を行うシステムである。例えば、加工物を締め付ける締め付け治具やその位置、加工工程、加工領域、加工順序、使用工具、加工条件の決定、工具経路の生成およびCNC工作機械を制御するためのNCデータの作成を行うものである。狭義では、設計された形状を加工するための工具経路を自動的に計算するシステムを意味する。

近年のコンピュータと情報技術の向上により、等高線や走査線の工具経路の生成だけではなく、高能率な加工や高速高精度な加工法など、さまざまな加工法を反映した工具経路が高速に生成できるようになってきている。また、工具経路の生成においては、パス落ちなどがほとんど発生せず、信頼性の高い工具経路を生成できるようになってきている。

CNC工作機械は、CAMシステムにおいて生成された工具経路に基づいて、CNC装置により工作機械を駆動し、要求された形状に素材を加工する。コンピュータと情報技術の向上により、ブロックの解析能力が向上し、微小線分の処理能力が向上すると共に、さまざまな制御技術がCNC装置に取り入れられ、高速高精度加工を可能にしている。

近年の工業製品に要求される高品質、短納期、低コストを実現するには、これらのCADシステム、CAMシステム、CNC工作機械は加工システムにおいて必要不可欠な構成要素であると共に、これらの構成要素を繋ぐデータの流れを、整理、統合、システム化することが重要となる。

一方、消費者が求める多種多様な工業製品のほとんどは、その品質を均一に保証し、生産コストを低減するために、金型を用いた大量生産方式を採用している。金型の素材には鉄系材料が用いられ、その素材を機械的加工法あるいは電氣的加工法との組み合わせによって形状を加工し、磨き行程を経て、要求される製品形状を作り出す。近年の製品形状は、多くの曲面が複雑に組み合わされた形状が多く、その原型となる金型には、製品以上の精度と品質が要求され、併せて複雑な形状の加工を高速高精度に行うことが要求される。

高速高精度加工の要求に応えるため、CADシステムメーカ、CAMシステムメーカ、CNC製造メーカ、工作機械メーカおよびこれらの周辺機器メーカは、さまざまな手法を用いて高速化を図っている。

CAD/CAMシステムメーカでは、高速高精度加工に対応した加工法を取り入れた工具経路生成機能の開発、および加工効率を向上させる工具経路を生成する機能の開発に取り組んでいる。

また、工作機械においては、送り速度が、従来の数m/minから数十m/minになると共に、主軸回転数は数万rev/minから十数万rev/minまで回転できるようになっている。また、検出器の検出精度も数 μ mからサブ μ mに向上すると共に、機械の剛性も向上している。さらに、リニアモータの採用による機械的な摩擦による誤差の排除、そしてヘール加工や、多軸加工、側面加工などの加工形態の多様化がなされて、さまざまな手法が試みられている。

さらに、CNC装置においては、 $H\infty$ 制御やポストモダン制御などの新しい制御方式がCNC装置内の制御方式に採用されると共に、サーボの追従誤差を低減するために、フィードフォワード制御が採用されている。また、補間の誤差を低減するため先読み補間前加減速処理が開発されると同時に、CNC装置での補間周期は、十数msから数msになりCNC装置の位置制御精度を向上させている。また、CNC装置内部からサーボコントローラの処理内部まですべてをフルデジタル化し、処理速度を向上させている。

そして、CAMシステムとCNC工作機械を結ぶデータ通信速度は、従来の数キロbps (Bit per Second)から数百メガbpsとなり、短時間で大量データの転送が可能となっている。

しかし、消費者の高品質な製品を短納期でしかも安く手に入れたいという要求は絶えることが無く、製造メーカーではこれに応えるために更なる高速高精度化を図ろうとしている。このため、製品以上の精度と品質を必要とする金型に要求される精度はさらに厳しくなり、従来は数十 μm であった要求精度は、現在数 μm 単位になりつつある。

このように、高速高精度加工を支える技術が向上する一方で、さらなる高速高精度加工を実現するには、現状の加工システムでは十分に対応されていなかったさまざまな現象までを考慮した加工システムを実現する必要がある。

特に、加工中に生じる物理現象である、工具の切削抵抗によるたわみや熱による変形、工具摩耗、さらに工作機械の切削熱による変形、摩擦によるスティックモーション、CNC装置における工作機械の運動性能を考慮した加工精度の向上が必要になると考えられる。これら複数の誤差に対して、個別に補正する手法や技術は研究されているが、未だにコストの問題や性能の問題があり、実用化には至っていない。また、複数の誤差に対する補正を、CAMシステムメーカー、CNC装置メーカー、工作機械メーカーがそれぞれ個別に対応しているため、メーカー間に壁が存在し、補正における相互の情報不足によって精度良く補正を行うことが困難である。さらに、現実の加工状態では複数の誤差が複雑に入り組んでいるため、これらのすべての誤差について対応するには、加工システム全体で考慮する必要がある。

そこで、次世代の高速高精度加工を目指すには、高速加工を維持しながら、加工工程で発生する全ての誤差について補正できる加工システムの開発が必要となると考えられる。このシステムを構築するに当たっては、従来のようなCADシステム、CAMシステム、CNC装置、工作機械といった領域を無くし、加工後の形状が最適になるように、統合した加工システムを構築する必要がある。そのためには、従来のCADシステム、CAMシステムだけでなく、加工中に発生する物理現象までを共通して扱うことができる形状モデルの開発が急務となる。

さらに、加工工程全体を見た場合、高速高精度加工を実現するには、高速な送りによる高精度加工だけではなく、加工システム全体の効率化を図ることが重要となる。現在の加工システムでは、CNC装置の処理能力の向上により、大量のデータを高速に処理できるようになってきている。CNC装置が高速化された現在では、工具経路の生成および工具経路の検証に多くの時間を費やしており、工具経路の生成と検証が加工工程全体のボトルネックとなりかねない。このボトルネックを無くすには、工具経路を高速に生成できるCAMシステムと、工具経路を高速高精度に検証できるNC加工シミュレーションを開発する必要がある。

また、高速加工を実現するには、加工行程において除去体積の大きい荒加工を効率よく加工することが加工行程全体の高速化につながる。しかし、高速送りでの加工は工具の破損をまねくため、工具の負荷変動をさげなければならない。このためには、高速送りでの負荷変動を低下させると共に、高速送りが可能な効率の良い工具経路を生成する必要がある。

これらのことより、本研究における「高速高精度加工」は、高速送りで高精度加工するだけにとどまらず、高速加工を実現するための工具経路の高速な生成や、高速加工を実現する効率の良い工具経路生成、高速高精度なNC加工シミュレーションまでを含めた加工

システム全体の高速化、高精度化を対象としている。

このように、高能率で高速切削が可能な工具経路を高速に生成し、工具経路を精度良く高速に検証できると共に、加工後の形状が要求された形状と精度になるように補正できる高速高精度加工システムが実現できれば、同じ加工時間で加工精度を一桁上げた、高速で高精度な金型加工が実現可能となり、低価格で品質の良い製品を消費者に短い納期で安価に供給することが可能となる。

1. 1. 2 本研究の目的

本研究の目的は、加工後の形状が要求された形状と精度になるように、形状定義から加工までを含めて高速高精度に加工できると同時に、高速送りに対応した高能率な工具経路を高速に生成でき、高速高精度に工具経路を検証できる高速高精度加工システムを実現することである。この目的のために、以下の技術開発を行うことにより、高速高精度加工システムの実現を目指した。

- (1) 高速に工具経路を生成することができ、かつ高速高精度なNC加工シミュレーションにも対応できる形状モデルの開発
- (2) 開発した形状モデルに基づいて高速送りに対応した高能率な工具経路を生成する手法の開発
- (3) 開発した形状モデルに基づいて工具経路の検証を高速高精度に実行するNC加工シミュレーション手法の開発
- (4) 開発したNC加工シミュレーションより得た誤差を利用して、CADからCAMシステム、CNC装置、工作機械の挙動、加工中の物理現象に起因する誤差を補正し、高精度な加工を行う加工システムの開発

以上の開発を行うため、本論文では、具体的に以下の内容を取り上げた。

1. 現状の高速高精度加工技術の調査と問題点の整理。
2. 高速に工具経路を生成でき、かつ加工システム全体を通じて用いることができる形状モデルの開発とその性能の評価。
3. 開発した形状モデルがCAD/CAMシステムへ適用することができるかを確認するため、CAD/CAMシステムの基本機能の開発と評価。
3. 加工時間の短縮を目指し、開発した形状モデルに基づいて、高速送りに対応した高能率な荒取り加工用の工具経路を生成する手法の開発と評価。
4. NC加工後の形状を検証するための高速高精度なNC加工シミュレーション手法の開発と性能の評価。
5. NC加工シミュレーション後の形状に機械の運動誤差や、工具のたわみなどの物理的現象を再現できる高精度NC加工シミュレーション手法の開発と評価。
6. NC加工シミュレーションによって得られた誤差を用いて、CADからCAMシステム、CNC装置、工作機械の挙動、加工中の物理現象に起因する誤差を補正し、高精度な加工を行う加工システムの提案と試作と評価。

以上の高速高精度加工システムの基本的な機能を開発することにより、高速で高能率な工具経路の生成と高速高精度な工具経路の検証および、加工中の物理現象を補正した高速高精度な加工を実行できる高速高精度加工システムの実現の可能性を示すことが可能となる。

1. 2 本論文の概要

本論文では、生産性を向上させるために、加工データである工具経路を高速に生成すると共に、高速送りに対応した高能率な工具経路を生成でき、高速高精度なNC加工シミュレーションができる加工システムの開発と、ミクロンオーダで高速高精度な加工を実現する高速高精度加工システムの開発を目指している。そして、高精度加工を実現するためにCNC装置の運動誤差や、工作機械の姿勢変形、摩擦による非線形誤差、そして加工中における工具のたわみなどの物理現象までの補正を考慮した高速高精度な加工システムの提案と試作、評価を行う。

高速高精度加工システムの実現に対し、まず最初に工具経路の生成と加工中のさまざまな物理現象を同時に扱える形状モデルを提案し、CAD/CAMシステム用の形状モデルとして利用できるかの検討を行った。また、高速な加工を実現するために、提案する形状モデルを用いて、高速送りでの加工に対応した高能率な荒取り加工用工具経路を生成する手法を開発し、検証を行った。さらに、提案する形状モデルを用いてNC加工シミュレーションを高速高精度に行う手法を検討すると共に、加工誤差要因として代表的な運動誤差と工具のたわみをシミュレーションにより再現する手法を検討した。そして、NC加工シミュレーションの結果より予測される誤差をサーボデータに補正することにより、高精度化を実現する手法を提案、検討した。本論文の全体構成は図1.1に示すとおりである。

第1章は、緒論であり、本研究の背景と目的、概要などについて述べる。次に、第2章から第7章の概要について以下に示す。

第2章は、現状の高速高精度加工における誤差要因と問題点に関する調査を、CAD/CAMシステム、CNC装置、工作機械について行った結果について述べる。また、さらなる高速高精度加工を効率よく行うために妨げとなる、現状の加工システムの問題点と、誤差の補正手法に関する問題点を提起する。

第3章は、高速高精度な加工システムを実現するために、工具経路の生成からNC加工シミュレーションまでを統一して扱える形状モデルについて述べる。まず、現状の形状モデルの種類と問題点を述べた後、形状を離散化して持つ形状モデルの概念について述べ、新たな考えに基づくBoundary-Map形状モデルを提案する。また、このモデルを同じ離散化したデータ構造を持つ形状モデルと比較した結果について述べる。

第4章から第5章までは、主に加工システムの高速化を目指し、提案する形状モデルをCADシステムに適応すると共に、CAMにおける高速な工具経路生成、および高能率荒取り加工システムに適用した結果について述べる。

第4章では、提案する形状モデルがCADシステムの基本的な機能である形状の生成、

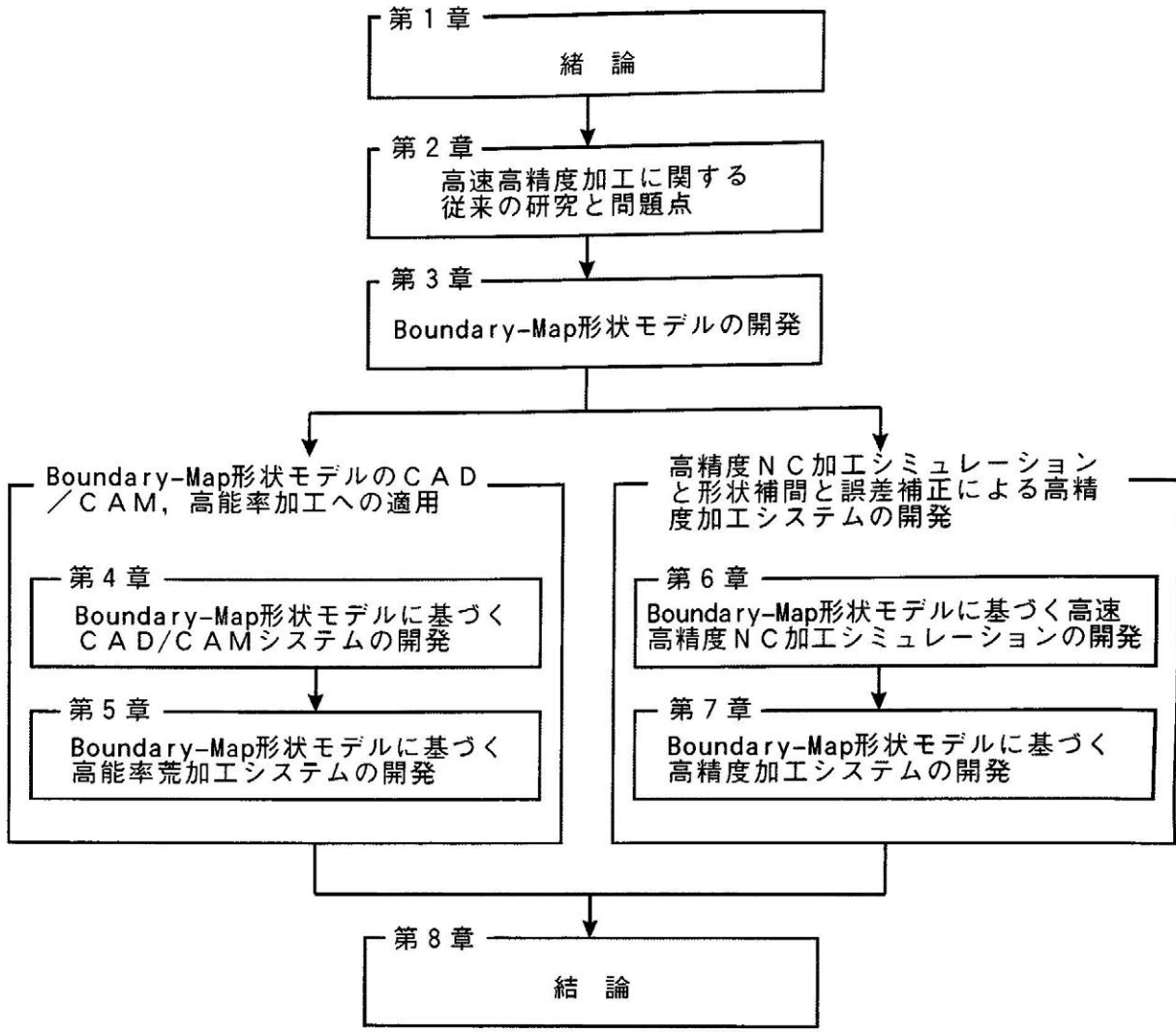


図1. 1 本論文の全体構成

編集, 表示処理が実行可能であることを確認するため, これらの機能を実現する手法について述べる. また同時に, 提案する形状モデルがCAMシステムの基本的な機能である等高線, 走査線の工具経路を高速に生成できることを確認するため, これらの機能を実現するための手法について述べる. また, 生成した工具経路を用いて実際に加工を行い, 処理速度などの性能を検証した結果についても述べる.

第5章では, 提案する形状モデルの特長を生かして, 高速送りに対応した高能率な荒加工を実現するための手法について述べる. 具体的には形状急変部の工具負荷を低減させると共に, 直線を主体とした工具経路に基づき高能率を目指す手法である. これらの加工を実現するための手法をBoundary-Map形状モデルに基づいて開発すると共に, 具体的な形状に対して工具経路を生成し, 汎用のCAMシステムが生成した工具経路と比較を行った結果についても述べる.

第6章から第7章までは, 主に加工システムの高精度化を目指し, 工具経路であるNCプログラムの検証と加工後の形状の検証を, 実加工を行うことなく確認でき, 生産効率を向上させることができるNC加工シミュレーションシステムの構築について述べる. さらに, NC加工シミュレーション結果にCNC装置や工作機械の運動誤差, 工具のたわみを

反映させることができる高速高精度なNC加工シミュレーション手法についても述べる。また、NC加工シミュレーションの結果より誤差を予測して、高速高精度加工のために誤差を補正するシステムについて述べる。

第6章では、従来のNC加工シミュレーションの手法について述べると共に、提案するBoundary-Map形状モデルを用いて高精度なNC加工シミュレーションを行う手法について述べる。また、従来のNC加工シミュレーションでは考慮されていなかった、CNC装置に起因する誤差の代表として運動誤差を、加工中における物理現象による誤差の代表として工具のたわみを対象としたNC加工シミュレーション手法について述べる。さらに、市販のNC加工シミュレーションとシミュレーションの精度について比較した結果についても述べる。

第7章では、CAMシステム、CNC装置、工作機械の運動誤差、加工中の物理現象を考慮して、形状モデルから直接サーボデータを作り出すことにより精度の高い指令を出力する手法を提案する。また、NC加工シミュレーションにより得られた運動誤差量より誤差を補正する手法について述べると共に、試作システムを構築して補正の検証を行った結果について述べる。

第8章では、本研究で得られた結果を総括し、結論とする。

第2章

高速高精度加工に関する従来の研究と問題点

2. 1 高速高精度加工の問題点と誤差要因

CNC工作機械の最近の技術的動向は、高精度と高生産性を同時に満たすための高速高精度加工の実現である。この手法の原理は高速加工と呼ばれ、工具の一回転当たりの切削量を少なくし、切削抵抗を抑えて工具、工作機械、工作物間の弾性変形や振動を低減させることにより高精度な加工を目指すと共に、主軸回転数と送り速度を高速化することで、単位時間当たりの切削量を多くする手法である^[1]。この原理はまた、切削プロセスで発生する熱が抑制され、工具や工作機械への熱の影響を防ぐことができると共に、工具の寿命を延ばすことができる^{[2][3]}。しかし、送り速度を高速にすると、工具の単位時間当たりの除去量は増大し、工具への負荷が増大する。さらに、高速送りでの除去量の急激な変化は、工具負荷の急激な変動を招き、工具のたわみや破損を引き起こす。このため、高速な送り速度で加工するには、高速送りに対応した工具経路を生成する必要があると共に、高速送りが可能で、高能率な加工ができる工具経路を高速に生成する必要がある。

一方、CNC工作機械は高速高精度加工を目指して進化を遂げてきており、主軸回転数の向上、CNC装置の制御技術の発展による指令精度の向上と送り速度の向上、フルデジタルサーボモータの採用と検出器の精度向上など、さまざまな対策が図られ、要求される加工精度は従来の100～10 μ mから一桁下がり数 μ mになってきている^[4]。

しかし、このようなミクロンあるいはサブミクロンの精度を要求される高速高精度な加工を目指した場合、指令精度の向上はもとより、従来では考慮されていなかった工作機械の熱変形や切削力による工具のたわみなどさまざまな物理現象の補正への対応が必要となる^{[5][6]}。

CNC工作機械を用いた機械加工は、最終的には工具と素材の相対運動であり、両者の間にはCAMシステムにおける工具経路の作成上の問題、CNC装置の制御上の問題、工作機械の精度上の問題、そして加工中の物理現象による問題など、さまざまな誤差要因が含まれている。図2.1に、現在の高速高精度加工において考えられる加工誤差要因を示

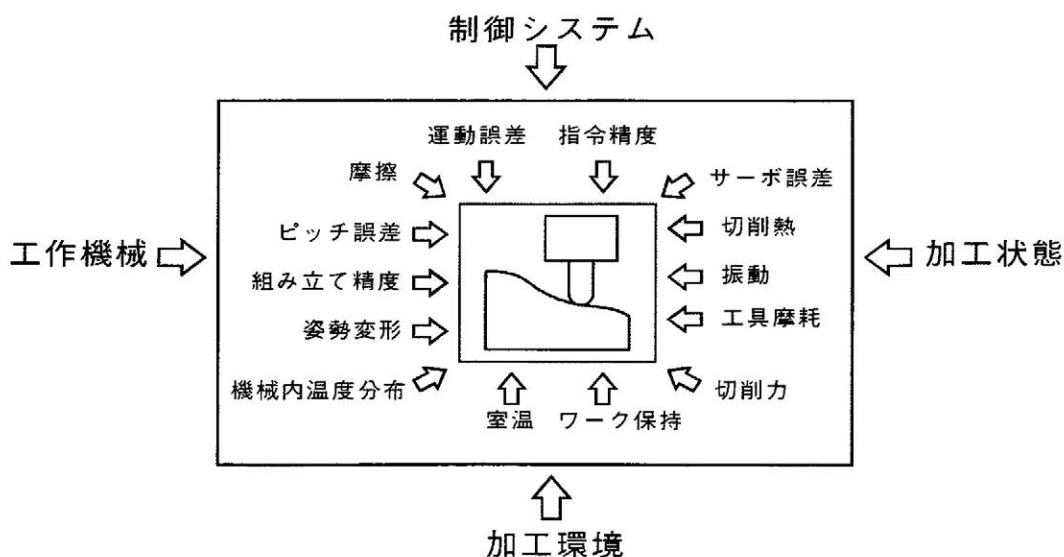


図2.1 加工誤差要因

表2. 1 加工誤差要因と誤差の大きさ

課題	誤差要因	現象	大きさ[μm]	
表面精度	工作機械	運動精度	加工面の凹凸	10~20
		主軸振れ	加工面の凹凸	10~20
		熱変位	加工面段差	30~50
		位置決め精度	加工面段差	10~20
	CAD/CAM	モデリング精度	加工面の凹凸	5
		CAMの精度	加工面の凹凸	5
		データ粗密度	加工面折れ	10~20
	工具	逃げ面粗さ	加工面微小キズ	1
		工具先端加工	加工ムシレ	10~20
		摩耗	加工ムシレ	10~20
		工具の動バランス	加工面の凹凸	10~20

す。同図より、CNC装置の補間や加減速による指令に起因する誤差や、サーボの追従遅れによる誤差、工作機械の組み立て精度や熱変形に起因する誤差、さらに、加工中に発生するさまざまな物理現象による工具の熱変形やたわみなど幅広い要因が加工誤差の原因となっていることがわかる。また、表2. 1は、車などに用いられる大型プレス金型における工作機械、CAD/CAMシステムおよび切削工具について、代表的な誤差要因とその表面の現象、誤差の大きさを示している^[7]。この表から、現状で発生している誤差がおおよそ十数 μm であることがわかる。

加工中に生じる誤差の発生箇所を、加工における情報の流れと併せて示したのが図2. 2である。加工対象形状は、CADシステムによってコンピュータ内にデジタル化され形状データとして保存される。CADシステムによっては、形状モデルを生成する際にCAMシステムで必要な精度を考慮せずに形状を生成する場合があります、形状の表現誤差を生じることがある。CAMシステムでは、コンピュータ内に取り込まれた形状データを基に、加工条件から工具をどのように動かすことにより要求形状を加工できるかを示す工具経路を計算している。CAMシステムの出力は一般にNCプログラムと呼ばれ、工具の動きを主に直線と円弧で表現している。形状が自由曲面から構成されている場合には、トレランスを基準に工具経路を直線や円弧によって表現しようとするが、この時トレランスによる誤差が生じる。また、曲面を直線で表現するため、幾何情報の劣化を生じる。

CNC装置は、CAMシステムにより計算された工具経路上を工具が移動するように位置指令を作成し、サーボモータによりテーブルを駆動する。このとき、CNC装置内部で行われる補間や加減速処理、そしてサーボの追従誤差により運動誤差が生じる。さらに、主軸やテーブルの摺動面より生じる発熱や、外気温度により工作機械全体が姿勢変形を起こし誤差を発生する。また、加工中の切削力により、工具のたわみや熱変形、摩耗が生じ誤差の原因となる。このように、現代の加工において情報の流れをみると、CADシステムから加工のための指令情報を作り工作機械を駆動させるまでの指令誤差と、工作機械を駆動している状態で発生するさまざまな誤差の総和が高速高精度加工における誤差要因となっている。

実際の加工はこれらの誤差が互いに影響を与えあい、複合して発生しているため、その

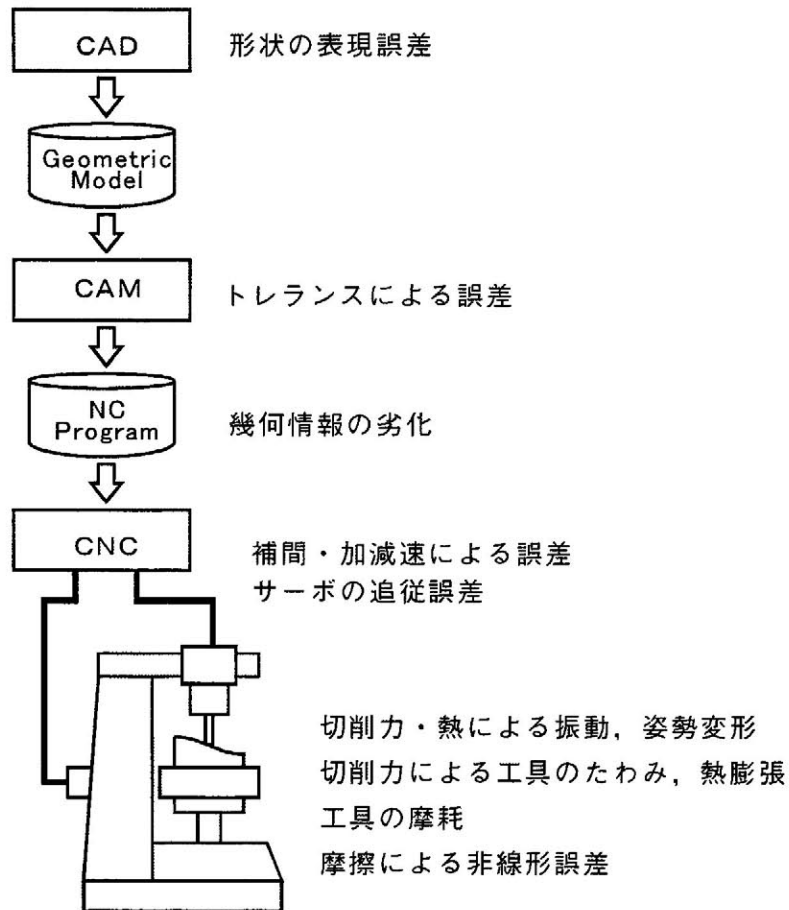


図 2. 2 加工の情報の流れと加工誤差

現象は複雑であり、複合現象の解明および補正は難しい。このため、従来からの研究では個々の原因について解析すると共に、精度を補正する手法が提案されている。

しかし、現在の誤差補正法は、それぞれ個別の誤差要因についてのみ補正しており、加工中に生じる複合した誤差を低減するには、CNC装置の制御技術も併せて、CADシステムで作られた形状モデルから最終的に工具を移動させるサーボモータ駆動データ(サーボデータ)までの流れを再考し、これらの過程において加工精度を補正する必要がある。

一方、高速高精度な加工を実現するには、高速な送りでの高精度な加工だけではなく、加工システム全体の効率化を図る必要がある。特に、工具経路の生成時間の短縮、高速送りに対応した高能率な工具経路の生成、および工具経路の高速で高精度な検証は、加工システム全体の効率化に重要な役割を果たす。

本章では、現在の高速高精度加工システムにおいて、高速高精度化を妨げる要因と、その要因を取り除くためのさまざまな手法に関する研究、そして、現状の問題点について述べる。

2. 2 CAD/CAMシステムに関する従来の研究と問題点

2. 2. 1 CAD/CAMシステム間の形状モデル

近年の汎用CADシステムにおいて、形状を定義する形状モデルの開発はほぼ終了し、実用段階に入ると共に複数の商用カーネルとして統一され始めている。現在のCADシステムは、幾何形状と加工フィーチャを結びつけるなどユーザインターフェイスの向上に力が入れられている。しかし、CAMシステムにおいて工具経路を生成する際に、現状の形状モデルでは、形状の表現精度や工具経路の生成時間、形状モデルとアプリケーション間のAPI (Application Programming Interface)の機能不足などの問題があり、現在のCAMシステムでは工具経路生成のために独自の形状モデルを用いる場合もある。

CAD/CAMシステムに統一して用いることができる形状モデルの必要性は、以前から提唱されていた^[8]が、現状ではCAD/CAMシステムに統一して利用できる形状モデルは存在していない。現在は、CADシステムとCAMシステムに同じカーネルを用いたシステムを用いるか、ダイレクト変換機能を用いてそれぞれの形状モデルに変換する手法が一般的である。また、変換の中間ファイルとして、両者の間の形状モデルをSTEP (Standard for the Exchange of Product model data)^{[9] [10]}表現により関連づける手法も用いられている。

今後の高速高精度加工を考慮した場合には、CAMシステムにおいても、加工中におけるさまざまな物理現象までを表現できる形状モデルが必要となると考えられる。現在のCAMシステムはあくまで形状モデルを主体に、荒加工、中仕上げ、仕上げなどの工具経路を生成しているが、本来はそれぞれ加工前の状態と加工後の形状との両方の情報から工具経路を生成すべきである。例えば、中仕上げの工具経路を生成する際には、荒加工終了後の形状と目標形状を用いることにより、負荷ができるだけ少なくするような工具経路を生成することができる。このとき、工具のたわみやCNC装置での加減速処理などを考慮すれば、より高速高精度な加工が実現できるものと考えられる。

2. 2. 2 CAMシステムにおける工具経路生成

CAMシステムの機能の向上は著しく、さまざまな加工ノウハウが工具経路に反映され、高速高精度な加工を実現してきている。しかし、現在のCAMシステムにおいては、CNC装置への指令にNCプログラムを用いることによる幾何情報の劣化、CAMシステムの工具経路生成時間と高速加工に対応した工具経路の生成手法の確立が問題となる。

(1) NCプログラムの表現能力の問題

従来の工具経路はCADシステムで定義された形状モデルを最終的には、NCプログラムとして円弧指令あるいは直線指令に変換する処理である。このため、NCプログラムは形状モデルの持つ形状情報を持たず、単純な直線と円弧の幾何形状のみで出力するために幾何形状の劣化を生じる。近年、幾何形状の劣化を防ぐ手法として、CAM内における形

状をNURBS曲面で処理し、NCプログラムにNURBS曲線を出力する手法が用いられている。しかし、NURBS曲線を用いて加工するには専用のハードウェアを持つNURBS対応のCNC工作機械を用いなければならない。

一方、NCプログラムの限界を解決するもう一つの手法として近年、工作機械メーカーとCAMメーカーが協力して、CNC装置の中にCAMシステムを取り込むと共に、CNC装置内部に形状モデルを持たせようとする動きがあり、ISO14649として規格化が進んでいる。これは、NCプログラムの限界をうち破る可能性を十分有しているが、CAMシステムに適した3次元ソリッドモデルが少なく現在では2.5次元しか対応できていない。さらに、この考え方はCNC装置内にCAMシステムを取り込み、リアルタイムで工作機械を駆動させる手法であるが、現状では加工中に生じる物理現象のリアルタイムでの補正は困難である。

このように、NCプログラムの表現能力の問題を解決するために新しい手法が提案、利用され始めているが、依然として曲面加工においては、図2.3に示すように、工具経路の許容誤差であるトレランスをもとに微小線分として工具経路を生成する手法が一般的である。

微小線分を用いての高精度な加工が要求された場合、微小線分の長さはミクロン単位となり、送り指令に対して微小線分が極端に小さい場合にはCNC装置のブロック解析処理が追従できない現象が生じる。また、微小線分の間隔(長さ)は送り速度やCNC装置の機能とは無関係にトレランスからのみ決定される^[11]が、CNC装置での内部処理はCNC装置の機種によって、線分の解析手法、補間周期、補間手法、加減速手法などが異なるため、同じNCプログラムであっても、CNC装置が異なると加工後の形状精度や表面精度に違いが生じる^[12]。このため、高速高精度な加工を目指すには、CNC装置の特性を考慮して工具経路を生成する必要がある。また、加工中の形状や工具のたわみによる誤差を反映できる形状モデルが利用できれば、これらを補正するような工具経路をNCプログラム化することなく形状モデルから直接サーボに出力するデータとして生成することにより、高速高精度加工が可能となると考えられる。

しかし、現状ではCAMシステムとCNC装置とのインターフェイスはNCプログラムが主流であり、CNC装置の処理手法や加工中の現象を考慮したCAMシステムも存在しない。

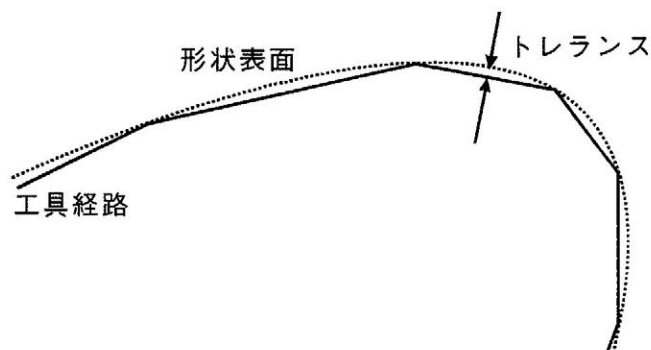


図2.3 CAMにおけるトレランス

(2) CAMシステムの処理時間の問題

高速高精度な加工を実現するため、CAMシステムには、「高精度な工具経路を生成できること」、「高速に工具経路を生成できること」、「パス落ちのない信頼性の高い工具経路を生成できること」が要求される。一方で、CNC装置や工作機械の高速高精度化が著しく進んでおり、多量のNCプログラムも高速高精度なCNC工作機械によって短時間で処理することが可能となってきている。このため、工具経路生成に時間を要している現状では、CAMシステムでの工具経路生成時間が高速加工のボトルネックとなることが考えられる^[13]。

現在のCAMシステムでは、「高精度な工具経路を生成できること」、「パス落ちのない信頼性の高い工具経路を生成できること」という条件はほぼ満たされているため、CAMシステムの高速な工具経路生成が高速高精度加工を実現するには必要不可欠となる。

CAMシステムの高速化を実現するには、CAMシステムの処理に適した、高精度で、かつ高速演算が可能な形状モデルと処理アルゴリズムの開発が必要となる。しかし、現状ではCAMシステムの高速処理を満たすに十分な形状モデルおよび工具経路の生成手法は存在していない。

(3) 高速加工に対応した工具経路の生成手法の問題

高速高精度加工により送り速度が高速になると、CAMシステムは高速な送り速度を考慮した工具経路を生成する必要がある。特に、現在の高速高精度加工では、等高線工具経路を主体に高速な送り速度で加工を行うため、形状急変部における除去量の増減に伴う切削負荷の著しい変動は、工具の振動や破損を招き、高速加工を妨げる要因となる。

切削中における工具負荷の低減を図る手法として、NC加工シミュレーションを用いて工具の除去量を計算し、送り速度を低減する手法が実用化されている。また、工具経路を高速加工対応にする手法として、平行線工具経路（一発大荒カケ上がり手法^[14]など）や、形状急変部を先に除去する手法などが考えられる。しかし、高速加工に対応して、形状急変部における負荷変動を低減すると同時に、高能率な工具経路を高速に生成できる手法は確立されていない。

2. 2. 3 NC加工シミュレーション

近年、加工の対象形状が複雑になるに従って、工具経路も複雑になり、工具経路の検証は困難になってきている。特に、高速加工が実用化されつつある現在、工具経路の不備は、工具や工作機械に大きなダメージを与える原因となる。工具経路の検証には、実機での検証や試し削りが用いられているが、加工形状の複雑化に伴い工具経路の長さが膨大になりつつあるため、検証に多くの時間を要している。CAMシステムにおいて高速に工具経路が生成され、CNC装置が高速に工具経路を処理できるようになると、工具経路の検証が加工全体のボトルネックとなる可能性がある。

工具経路の検証を高速化するため、実際に加工を行うことなく加工中における工具の干渉状態や、加工後の形状を確認できるNC加工シミュレーションシステムが利用されており効果を挙げている。しかし、現在のNC加工シミュレーションは微小線分のような大量のブロックを処理するには膨大な時間を要する。また、画面の精度により干渉チェックの

精度が左右されるため、完全な干渉チェックを行うことが難しい。

また、要求精度が数十 μm から数 μm になりつつある現在、NC加工シミュレーションにおいても、工具のたわみや熱変形などを考慮したNC加工シミュレーションが必要となると考えられるが、現状ではこれらの数 μm の誤差をNC加工シミュレーション後の形状に反映できるNC加工シミュレーションは存在していない。

CAD/CAM間の形状モデルの問題やCAMシステムの処理時間の問題を解決するためには、CAMシステムにおいて、工具経路の生成だけでなく、加工中の物理現象をシミュレーションできる形状モデルが必要となる。また、CAMシステムに適した形状モデルとして、CAMシステムに必要な形状の表現能力と表現精度、高速な工具経路生成処理が可能な形状モデルが要求される。しかし、現在このような形状モデルは存在していない。そこで、本論文では、CAMシステムに必要な精度で、高速に工具経路を求め、高速な干渉チェックを行うと共に、NC加工シミュレーションまでを高速に行うことが可能な形状モデルとして、Boundary-Map形状モデルを新たに提案しており、第3章においてBoundary-Map形状モデルの概念と特徴について述べる。

また、提案するBoundary-Map形状モデルが、汎用のCADシステムと同様に形状の表現、編集そして表示ができるかを検証するため、CADシステムの基本となる機能の開発を行った。基本機能の実現方法と結果については、第4章で述べる。さらに、CAMシステムの処理時間の高速化を実現する手法として、Boundary-Map形状モデルが工具と加工対象形状との接触点検出処理が高速であることに着目し、Boundary-Map形状モデルから高速に工具経路を生成する手法を開発した。Boundary-Map形状モデルを用いて工具経路を生成する手法と検証結果についても、第4章で述べる。

そして、高速加工に対応した工具経路の生成手法として、高速加工可能でかつ高能率な工具経路生成を実現するため、Boundary-Map形状モデルの領域探索処理や干渉チェックが高速なことに着目し、加工領域を検出すると共に、検出した加工領域に対して直線状の工具経路を主体とした工具経路を生成する手法を提案している。また、形状急変部を事前に穴加工して除去する手法を提案し、これらを組み合わせることにより、高速送りに対応した高能率な荒取り加工用工具経路の生成手法を開発した。提案する、Boundary-Map形状モデルに基づく、高能率な工具経路を生成する手法および、その効果については第5章で述べる。

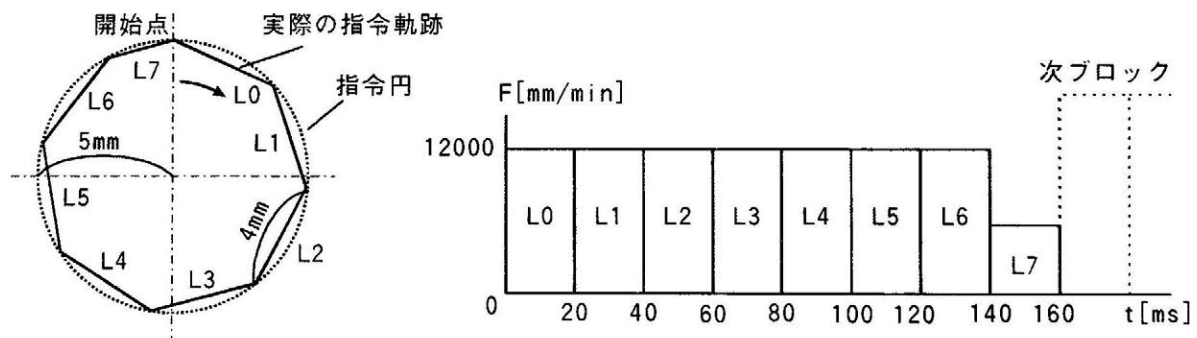
また、工具経路の検証の高速高精度化を実現する手法として、大量のブロックからなる微小線分の工具経路であっても高速にNC加工シミュレーションできると共に、画面サイズに関係なく高精度な干渉チェックが行えるNC加工シミュレーションをBoundary-Map形状モデルに基づいて実行する手法を開発した。さらに、加工中に生じる運動誤差や物理現象である工具のたわみをNC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を合わせて開発した。Boundary-Map形状モデルを用いて高速高精度にNC加工シミュレーションを行う手法と検証結果については第6章で述べる。また、NCプログラムの表現能力の限界を解決するため、幾何形状から直接サーボデータを生成すると共に、誤差をサーボデータに対して補正することによって高精度化を図る手法を開発した。この手法については、第7章で述べる。

2.3 CNC装置に関する従来の研究と問題点

2.3.1 補間と加減速処理

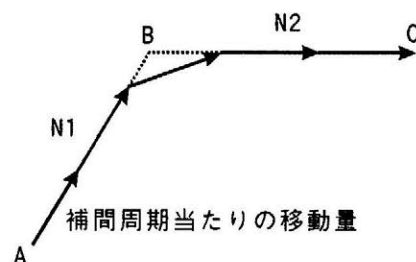
CNC装置はNCプログラムの読み込みと解析,そして各軸への補間,加減速処理をリアルタイムに行い工作機械を駆動している.このため,CNC装置のサンプリングタイム(補間周期)毎に,これら一連の処理を行う必要がある.補間処理は,与えられた直線や円弧指令と指令速度から,補間周期毎にどの位置を通過する必要があるかを求める処理である.指令軌跡は補間処理により補間周期毎の直線指令となるため,指令位置に対して実際の軌跡が指令軌跡上を移動できない現象が生じて補間誤差の要因となる.例えば,図2.4(a)に示す半径5mmの円弧を送り速度12000mm/minで加工する場合,補間周期が20msであると,補間周期毎の移動距離は4mmとなり,指令した軌跡は円弧ではなく八角形となる.これを防ぐには補間周期を短くすることが考えられるが,CPUの処理速度が高速化しても補間周期をゼロにすることはできない.また,図2.4(b)のように,補間最後の移動量L7が指令移動量より小さくなっており,補間周期と送り速度によってブロックの終端に端数が生じることがわかる.これは,1ブロックでは問題とならないが複数ブロックN1,N2にまたがって移動する場合,図2.4(c)に示すように移動軌跡がNCプログラム上のB点を通らなくなり,指令軌跡に誤差を生じる.

CNC装置内では,補間処理され各軸に分配された指令速度に対して,瞬時にサーボモータの送り速度を指令速度にすることは不可能であるため,補間したデータに加減速処理を行う.加減速処理は大きな慣性を持つ工作機械を駆動するためには必要不可欠な処理



(a) 指令円弧

(b) 送り速度



(c) 複数ブロックでの補間

図2.4 補間による誤差

である。このように補間処理の後に加減速の処理を行う手法は、補間後加減速処理と呼ばれている。しかし、この補間と加減速によって、実際の軌跡が指令軌跡上を動かない運動誤差が生じる。これらの現象が顕著に現れるのは小さな円弧を高速で動かした場合に、指令円より小さくなる円弧半径減少やコーナ部でのダレである。

コーナ部のダレが発生する原理を図2.5に示す。いま、図2.5(a)に示すように+Y方向に移動後、+X方向に送り速度Fで移動する指令を与えた場合、補間によって図2.5(b)に示すようにX軸、Y軸に分配された後、図2.5(c)に示す加減速処理(リニア加減速)が行われる。このとき、加減速処理によってコーナの部分ではX、Y軸共に軸移動していることがわかる。この事はY軸が減速しているとき、X軸は加速していることを示している。さらに、実際には、サーボ処理により最終的な速度は図2.5(d)

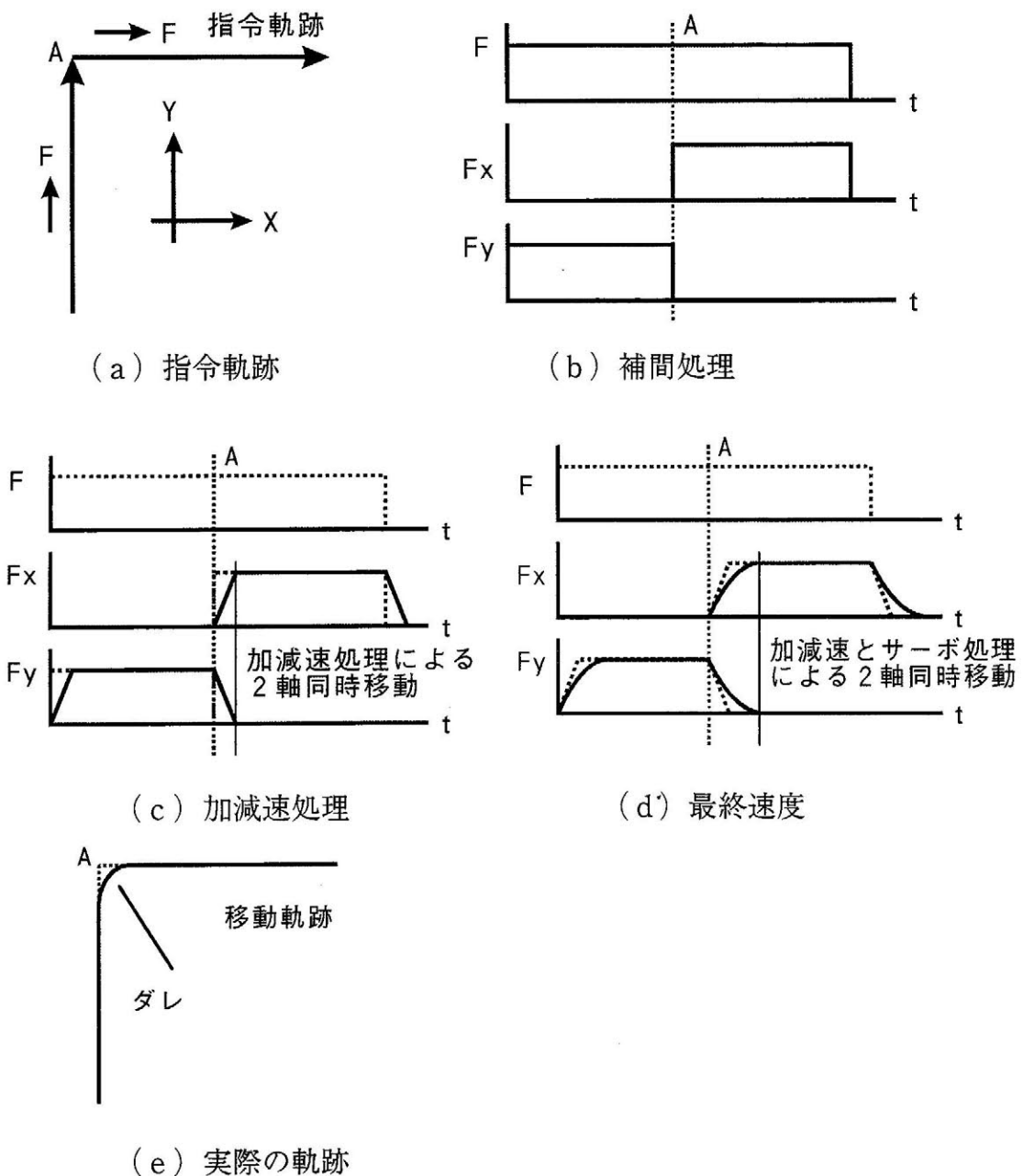


図2.5 補間後加減速によるコーナのダレ

に示す速度となる。このコーナ部での2軸同時移動が原因で、実際の軌跡は図2.5(e)に示すように、コーナ部にダレを生じる。

これらの補間と加減速に起因する誤差をなくすため、近年の高速高精度CNC装置では、補間処理と加減速処理の順番を入れ替えた補間前加減速処理を採用している。これは、常に進行方向に対して指令速度になるように加減速処理を行い、加減速処理した速度データを基に軸分配である補間を行う手法である。補間前加減速では図2.6(a)に示すコーナの指令を受けたとき、図2.6(b)に示す進行方向の指令速度に対して、まず加減速を行う。その結果は図2.6(b)に示す加減速後の速度になり、実際にコーナの部分を指令速度で曲がることができないため、指令されたトレランス以下で角を曲がることができる速度を求め、その速度まで減速させる最適化処理を行い、図2.6(b)に示す加減速の最適化後の速度となる。

図2.6(b)で生成した加減速の最適化後の速度パターンを図2.6(c)に示すようにX、Y軸に分配(補間)することにより、同時に2軸が移動する事を防いでいる。このとき、コーナの部分で減速するかしないかの判断を行う必要があるが、CNC装置側では加工対象形状の情報がないため、図2.6(d)に示すNCプログラムによる直線情報から得たブロック間のなす角度 θ から判断している。しかし、自由曲面加工など指令ブロックの長さが補間周期当たりの送り速度に比べて小さい場合には、減速すべき角部の減速が指令ブロック内で間に合わなくなるため、現在のCNC装置では100ブロック程度先の読みを行って、減速するかを判断している^[15]。

しかし、このようにブロックのなす角度により減速すると、図2.7(a)に示す曲面

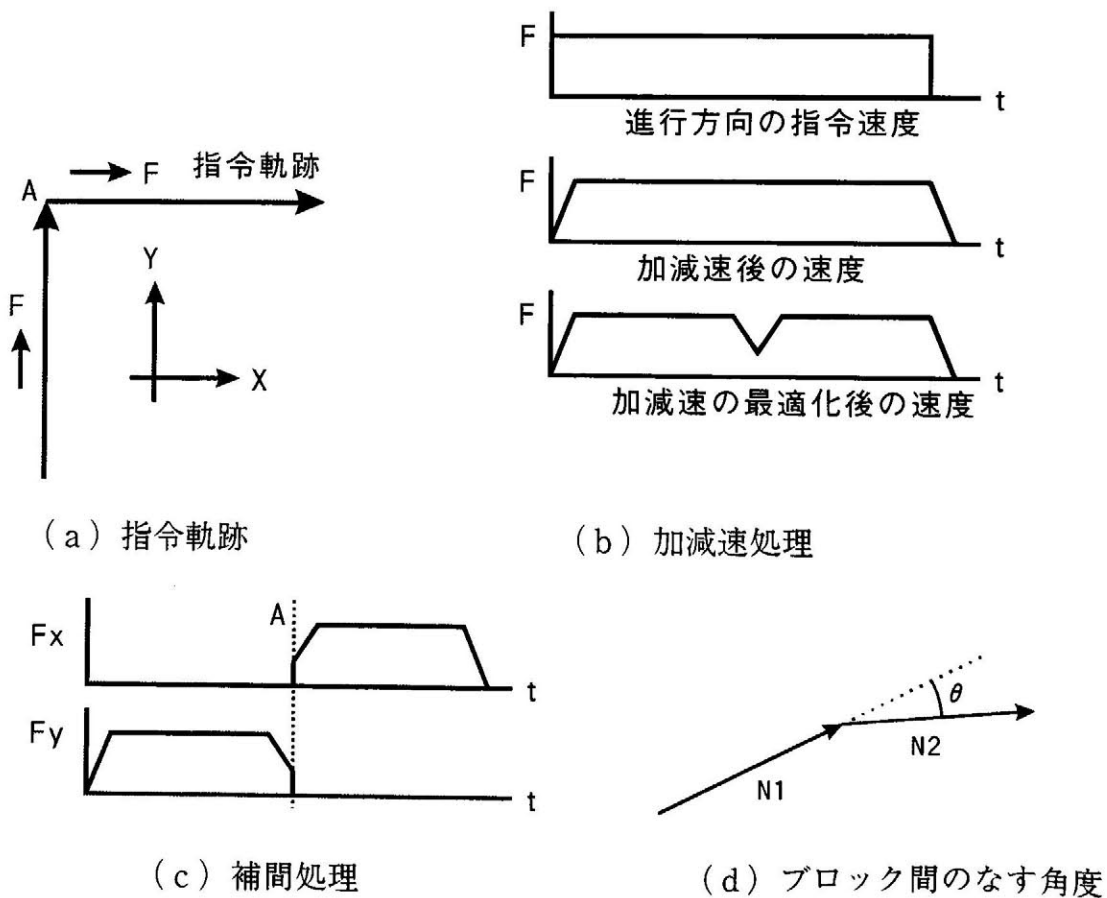
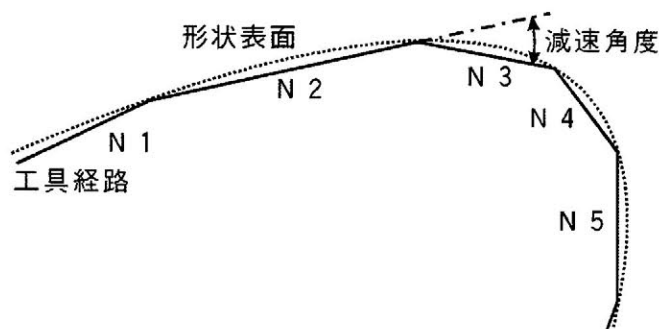
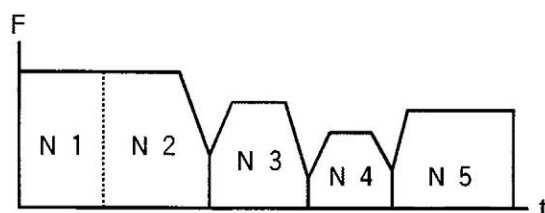


図2.6 補間前加減速処理



(a) 工具経路



(b) 加減速処理後の速度

図2. 7 補間前加減速処理における不要な加減速

加工における微小線分においては、図2. 7 (b)に示すように必要以上に加減速が働き機械の動きが不連続となり、加工時間の増大や、加工面の劣化を招く^[16]。また、形状ごとに最適な減速角度を求めることは困難を要し、現実的ではない。このため、微小線分のなす角ではなく、ブロック先読みにより得た直線情報から幾何形状を予測し、予測した形状に基づいて曲線補間する手法も提案されている^{[17][18]}。しかし、NCプログラムから幾何形状を予測したとしても、予測した幾何形状がCAMシステムの持つ幾何形状と一致する保証はない。

微小線分に対する不要な減速処理に対応するため、近年のCNC装置ではNURBS補間を採用している。NURBS補間を行うには、CNC装置にNURBS補間専用のRISC (Reduced Instruction Set Computer)チップを搭載したハードウェアとソフトウェアを用いる必要がある。NURBS補間は、CADシステムやCAMシステムが内部データとして持つ幾何形状であるNURBS曲面を基に、幾何形状を直接工具経路としてCNC装置に渡し、CNC装置内部でNURBS曲線を補間することにより加工を行う手法である^[19]。この手法の利点は、NCプログラムを小さくできることや、補間の周期が小さく、NURBS補間中は不用意な減速が低減されるため、加工面がきれいになることがあげられる。従来の補間前加減速を用いた手法と比較した図を図2. 8に示す。

従来の曲面加工は、曲面を微小点群に分割し、微小線分により表現していた。前述した補間前加減速処理を行うCNC装置はこの微小線分を先読みし、予測した形状と微小線分間のなす角度から減速パターンを計算する。しかし、設定した角度によっては図2. 8 (a)に示すような不要な加減速が頻発し、加工時間の長大化を招く。一方、NURBS補間では、曲面内部では減速を行わないため、図2. 8 (b)に示すように滑らかな速度パターンを生成できる。

しかし、現状のCAMシステムでは、CAMシステム内部で直接表現されたNURBS

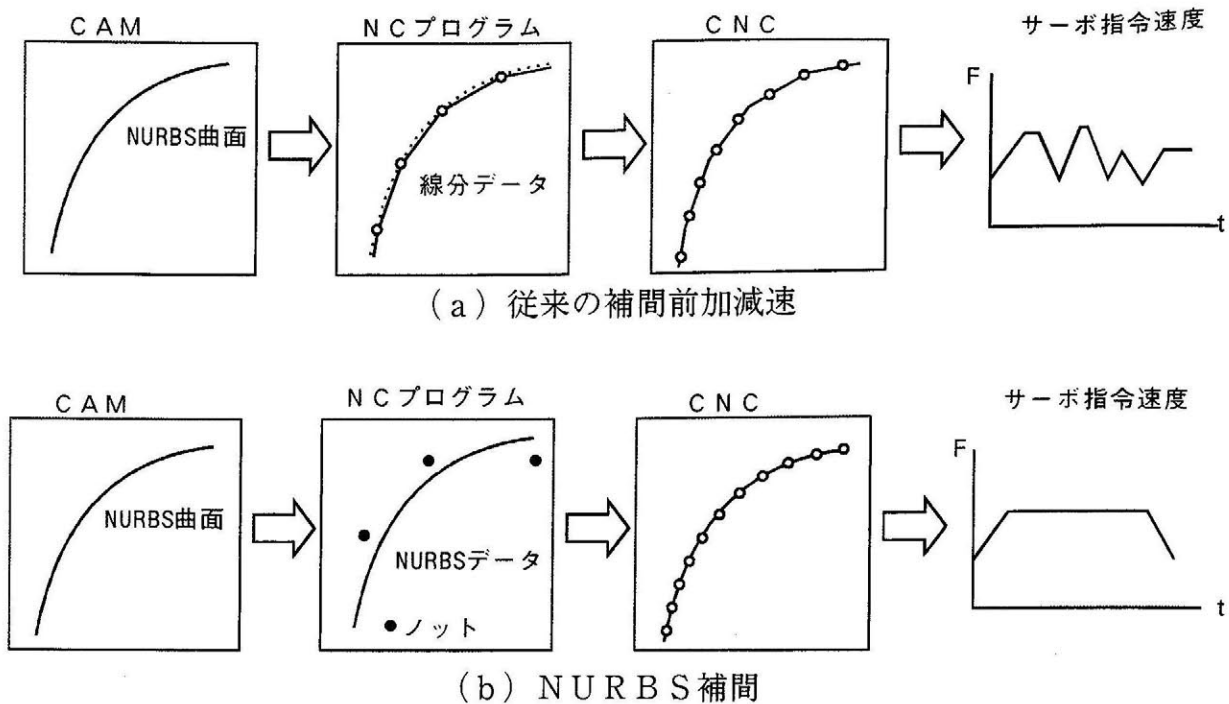


図2. 8 NURBS補間処理

曲面から直接オフセット面を生成するのが困難であるため、点群あるいは微小面パッチにして求めたオフセット値からNURBS曲線を作り出すため誤差を含んでいる。また、NURBS補間はトレランス量を低減できるがトレランス量をゼロにできるわけではなく、工作機械の精度が向上した場合にはさらなる単位時間当たりの処理能力が要求され^[20]、リアルタイム処理では要求精度を満たすことができなくなる可能性がある。また、NURBS補間を用いることで、送り速度の高速化が可能であるが、NURBS補間での1ブロック内において、加減速の大きな変動を多く要求する形状の加工においてはむしろ加工時間が延びるなどの問題点を持っている^[21]。

一方で、従来使用されている指数加減速、リニア加減速、ベル形加減速など加減速のパターンを新たに設計し、円運動における軌跡の精度向上を目指す試みが行われているが^[22]、この手法は、運動誤差を根本的に解決できる手法ではない。

2. 3. 2 サーボの追従誤差

現在の工作機械の送り駆動系は、ボールネジによりテーブルを駆動する手法が一般的であり、ボールネジ駆動にはACサーボモータが使用されている。サーボモータを用いて機械を制御した場合、目標値に制御対象の出力を追従させるためにフィードバック制御が利用される。一般に、工作機械は送り駆動系にフィードバック制御を持つため、指令位置と実際の軌跡には追従誤差が生じ、送り速度が速い場合には加工誤差として顕著に現れる。

追従誤差を防ぐために、さまざまな手法が提案されているが、大別すると制御系の改良による手法と、追従誤差を予測してあらかじめ指令値に加える手法に分類できる。

制御系の改良により、追従誤差を防ぐ最も簡単な手法はフィードバックループ系に

フィードフォワード制御を追加することである^[23]。しかし、フィードフォワードゲインを上げると機械の振動を誘発し、完全に追従誤差を防ぐことはできない^[24]。そこで、比例項で構成されている従来の位置ループ系を高次化することにより応答性を向上させるサーボ系のハイゲイン化の研究が進められている^[25]。また、サーボ誤差特性を事前に把握しておき、CNC装置側で発生すると予想される誤差をゲイン補正、位相補正しながら補間演算を行う手法が提案されている^[26]。さらに、サーボ系の入力にあらかじめ逆伝達関数を乗じる修正逆伝達関数制御法^[27]も提案されているが、曲率が大きい角部では急激な加減速を必要とするため、すべての形状に対応できていない。また、近年では、 H_{∞} 制御や現代制御理論をサーボ系に応用する試みも研究され^{[28][29]}、これらの制御手法について比較を行った研究も行われている^[30]。

一方、予測した追従誤差を補正する手法として、運動誤差をオフラインでシミュレーションして補正值として用い、使用しているシステムの変更なしに、外乱として制御系に入れる事により指令軌跡の精度向上を目指す手法が提案されている^[31]。また、予測される誤差より、機械の設定条件と位置決め誤差との関係を求め、補正值をニューラルネットワークにより同定する手法も提案されている^[32]。

さらに、出力した指令位置と現在の位置を比較し、誤差量を指令値に追加して軌跡制御を行う手法が提案されている^[33]。また、制御系をモデル化し、現在値から軌跡誤差を予測し、事前に補正量を指令位置にリアルタイムに補正を行う手法も提案されている。この時、補正のサンプリング時間は2 msである^[34]。現在の高速高精度CNC装置のNURBS補間に用いられている補間周期が1 msであることを考えると、リアルタイムで多数の誤差要因に対する補正処理は困難であると考えられる。

このように、サーボの追従誤差については、多くの研究と対策がとられており、実用化が進んでいる。しかし、摩擦などによるスティックモーションやロストモーションなど非線形誤差とを組み合わせる補正する手法はまだ確立されていない。

CNC装置の出力する指令精度を向上させるために、補間前加減速やNURBS補間が用いられ、指令精度は著しく向上している。しかし、依然としてNCプログラムに忠実に動くことが目標であり、CAMが持つ幾何形状に基づいた最適な加減速を含む指令位置をサーボモータに出力できていない。また、指令位置を作成する際には、工作機械の変形や工具の変形などの補正はまったく考慮されていない。

さらに、サーボ系への追従誤差についてはさまざまな制御方式が用いられ、効果を挙げているが、テーブルの挙動を含めた線形的な誤差、非線形的な誤差を同時に解決する制御方式はまだ実現されていない。

NCプログラムの表現能力の問題を解決する手法として、本論文ではCAD/CAMシステムからNCプログラムを介さず、幾何形状から直接加減速処理と補間処理を行い、サーボデータを生成して工作機械を駆動する手法を提案している。また、サーボの追従誤差については、事前に誤差量を予測してサーボデータに補正值を足し合わせるにより補正する手法を提案している。具体的な考え方と手法については、第7章において述べる。

2. 4 工作機械と加工中の誤差に関する従来の研究と問題点

2. 4. 1 工作機械の誤差に関する従来の研究と問題点

(1) 主軸の振動と熱変形

高速加工が実現されると共に、主軸回転数の高速化が著しく進んでおり、回転数は数万rpmから十数万rpmの主軸が使用されるようになってきている。現在の主軸において、主軸を高速で回転させた場合、低回転では影響が少なかった主軸の偏心が高速回転により主軸の振動を引き起こす原因となる。主軸の振動は工具寿命に影響を与えるため、高速回転で加工する小径工具になるほどこの現象は顕著となる。主軸の振動を低減させるためには、工作機械メーカーにより、主軸構成部品の加工精度と組み立て精度の向上による対策がなされている^[35]。

また、主軸の高速化により、ベアリングが回転するときの摩擦熱によって、スピンドルヘッドが伸縮、曲げ変形する問題が生じている。現在使用されている高速高精度加工用の主軸では、主軸の振動を $5\mu\text{m}$ 、熱変形を $10\mu\text{m}$ 程度に抑えている^[36]。しかし、高精度な加工を実現するにはこれらの変形を低減あるいは補正する必要がある。高速回転と高剛性を満たそうとするとベアリングでの発熱はますます増加するため、主軸における熱対策としては、ベアリングを強制的に冷却する手法がとられている。

また、現在の高速回転対応の主軸に使用されている空気軸受けは高速回転性に優れ、回転性能は高いが負荷容量が低いいため、使用する工具や切削条件に制約がある。これに対して、剛性が高く主軸中心軸位置の制御可能な磁気軸受けが実用化されようとしているが、高価で発熱が多く、外乱に対する応答性が悪いなどの問題点を持っている^[37]。

主軸の振動や熱問題は工作機械メーカーの努力により低減されてきているが、いずれの場合もゼロにすることは不可能である。

(2) 摩擦によるスティックモーション

工作機械のテーブルはボールネジとナットにより駆動され、テーブルはベッド上の摺動面上を移動する。現在の一般的な高速高精度CNC工作機械のボールネジを用いた駆動では送り速度は $30\sim 50\text{m}/\text{min}$ 程度である。

ボールネジを用いてテーブルを駆動するとき、テーブルとベッドの摺動面には、静摩擦と動摩擦が生じる。軸の駆動方向が反転する際、機構各部に生じる静止摩擦力によって軸の動きが遅れるために生じる現象をスティックモーションという。このとき、摩擦力が静止摩擦より大きなトルクが付加されたとき、静止摩擦力から指数関数的に動摩擦へ移行することがわかっている。

スティックモーションを補正するため、CNC装置ではサーボモータにおいて、軸が反転する際にトルクをパルス状に与える手法がとられている。しかし、高速送り時にはタイミングがずれたり、パルスの大きさに不都合が生じることがあり、スティックモーションを完全に除去することができない。

このため、スティックモーションの現象をコンピュータ上でシミュレーションし、補正

値を位置指令に加算して補正する手法が提案されている^[38]。また、サーボモータによりスティックモーションを補正するのではなく、軸駆動用モータ以外にスティックモーションを補正するためのモータを用意し、機械的にテーブルにスティックモーションを除去する装置を付けて補正する手法が提案されている^[39]。さらに、機械の非線形要素による機械の形状誤差を削減するバンバン制御を制御系に採用する手法が提案されている^[40]。

一方、摩擦により軸移動の反転時には、ボールネジのねじり剛性不足により、ロスモーションが生じる。ロスモーションは、一般にCNC装置におけるバックラッシュ補正として軸反転時に指令値にステップ信号を付加する。しかし、通常のステップ形ロスモーションと異なる漸増形ロスモーションは現在のバックラッシュ補正では対応できない。このため、新たな補正方法が研究されている^[41]。

さらに近年、これらの摩擦による誤差要因を取り除く手法として、リニアモータを利用する手法が提案されると共に、60m/minの送りまで高速化され、実用化され始めている。しかし、リニアモータは高価であり、熱の発生が多いために冷却装置が必要になるなどの問題でハイスペックな工作機械でしか利用されていない^[42]。

(3) 組み立て誤差と姿勢変形

工作機械のテーブルはベッドと一体化して組み立てられるが、組み立てたときに、直角度や平行度などに組み立て誤差を含む。また、個々の部品における構成要素の幾何学的誤差を含んでおりこれらが誤差要因となる^[43]。現在のCNC装置では、組み立てた後にこれらの誤差を測定し、CNC装置にピッチエラー誤差として設定することにより補正を行っている。

しかし、実際の加工において重量物を加工する場合、ワークの重量により工作機械全体にたわみを生じることがあり、これらが工作機械の姿勢変形となり誤差の原因となる。また、加工中においては、加工により発生する切削力によって工作機械全体に姿勢変形を生じる。現在の工作機械では、これらの動的な重量の変化による補正はまだ対応されていない。

(4) 熱変形

工作機械の熱変形は、時には数十 μm に達することがあり、従来から熱変形に対してさまざまな試みがなされている。まず、熱変形の要因としては、モータの発熱、摺動・転動部の摩擦熱、加工熱のほかに外気温の変動、室内温度の不均一、室内上下部の温度差、直射日光や暖冷房からの風や輻射熱、人体の発する放熱などが挙げられる。

この誤差をなくすには工作機械の外気を一定に保つ必要があり、恒温室内に工作機械を設置しなければならない^[44]。しかし、設備が大きくなりコストがかかることや、工作機械の長時間運転による工作機械の部分的な熱による変形は防ぐことができない。また、工作機械メーカーでは、これらの熱源を熱源ごとにそれぞれ冷却する手法や構成素材の変更による対策^[45]もとられているが、発熱を完全に抑えることができないため、主軸モータや軸受けなどの内部熱源と周囲の温度により工作機械に不均一な温度分布が発生し、工作機械内に熱の分布が発生する。

現在の熱変形の補正には、熱変形を積極的に利用する方法、圧電素子などで能動的に補

正する方法，ソフトウェア的に制御する方法がある。

熱変形を積極的に利用する方法は，熱変形を同定することにより，熱分布を設計者の望む形に起こさせ，熱変形した後に適切な状態になるように工作機械を一部変更して設計する手法である^{[46][47]}。

能動的に熱変形を補正する手法としては，熱変形を変形センサで検出し，コラム下部に設けた熱アクチュエータにより能動的にコラムを変形させ熱変形を補正する手法が提案されている^{[48][49]}。しかし，工作機械自体が大規模化し，コストが上がる問題が生じている。

ソフトウェアにより誤差を補正する手法としては，加工点における熱変位と機械の温度上昇との関係を表現する数学モデルを作成し，実験的に同定した結果により，CNC装置のピッチエラー誤差に適應して補正する手法が提案されている^{[50][51]}。また，同定法として，ニューラルネットワークを用いて同定する手法や，送り駆動系の温度上昇と位置決め誤差を測定し，両者の関係を分析し，ニューラルネットワークの学習機能を用いて誤差を予測する研究も進められている^[52]。さらに，周囲気温の変化によって変動する主軸とテーブル間の相対的な熱変形特性を定量的に明らかにする手法が研究されている^[53]。

一方で，工場の雰囲気温度や直射日光の照射などの外部熱源による熱変形に対する工作機械のカラーリングの影響に関する研究がなされており，色による温度の変化が指摘されている^{[54][55]}。

2. 4. 2 加工中の誤差に関する従来の研究と問題点

(1) 工具の切削力による熱とたわみ変形

切削中の工具には切削力が発生し，切削力に起因して切削中の工具と素材により発生する熱は工具や素材の変形を招くとともに，工具のたわみを招き加工誤差の原因となる。また，高速切削時における切削熱による工具逃げ面での摩擦による発熱は摩耗を増大させる原因となる^{[56][57]}。このように，切削力の工作物への影響は，加工誤差として重要な要因となるため^{[58][59]}，従来からさまざまな研究がなされている。

加工中の熱の発生を防ぐためには，切削油あるいはエアーによる直接的な空冷と，切りくずの排除方法を工夫する必要があるが，熱の発生を完全に無くすことはできない。また，熱が発生しない加工法や工具経路を生成する必要があるが，現在のCAMでは考慮されていない。

一方，加工中の工具のたわみを補正する手法には，事前にたわみを予測して補正する手法と，リアルタイムで測定しながら補正する手法の二つに大別できる。

たわみを予測して補正する手法としては，NC加工シミュレーションから除去量を算出し，除去量から求めた切削力を利用して工具のたわみを予測し，NCプログラムのブロックに補正值として与える手法が提案されている^{[60][61]}。しかし，NCブロック単位での補正しかできないため短いブロックでの高速送りに対応することが困難となる。

補正值をNCプログラムにしか反映できない理由は，CNC装置側にこれらの補正データを受け入れるポートがないことが原因である。この問題を解決する手法として，CNC装置の内部データを直接扱えるパソコンNC(PC-NC)装置を利用することが考えられる。工作機械を自律化するため，パソコンNCを用いた旋盤に対し，切削抵抗に基づき，

リアルタイムで送り速度を最適な送り速度に変える手法が提案されている^[62]。

また、たわみをリアルタイムで補正する手法として、加工中の切削力をリアルタイム測定し、切削力に応じた工具の変形補正量をCNC装置の位置指令に重ね合わせてたわみを補正する手法が提案されている。このとき、補正の周期は12.8msである^[63]。また、パソコンNC装置を用いて、工作機械に取り付けたセンサ入力に基づいてリアルタイムに誤差を補正するシステムが研究されている^{[64][65]}。

しかし、現在の高速高精度CNC装置のNURBS補間に用いられている補間周期が1msであることを考えると、リアルタイムでたわみを補正するには、補正処理時間に問題が生じる。また、リアルタイムで測定するためには、新たに測定装置が必要となる。

(2) 工具の切削力による振動

切削中に発生する切削力は、熱変形や工具のたわみだけでなく、びびり振動を誘発する。この振動は、加工精度や加工面、工具寿命に影響を与える。

びびり振動を防ぐため、エンドミルの切削中の挙動を時間領域で解析するとともに、シミュレーションしてびびり振動の発生を予測する手法が提案されている^{[66][67]}。そして、この予測から、送り速度や主軸回転数を制御して、びびり振動を抑制する手法が研究されている。また、ギャップセンサー等を利用して、びびり振動を検出し、積層型圧電アクチュエータを用いて能動的に減衰力を発生させることにより振動を制御する手法が旋盤に適用されている^[68]。

さらに、不等ピッチエンドミルにおいて切削シミュレーションを行い、振動が発生しないように最適ピッチ角度を求め、振動を防ぐことができる工具を開発する研究も行われている^[69]。

(3) 工具の摩耗

現在の高速高精度加工は、ひとつの工具で、荒取りから仕上げ加工までを行う方向にあり、この長時間の切削により工具に摩耗が発生して加工誤差の要因となる。工具摩耗を防ぐため、工具の形状や材質が研究されているがいずれも高価な工具となる。

工具摩耗による加工誤差を防ぐため、現在のCNC装置は、工具の使用時間によってZ方向に補正する機能を有している。しかし、これはあくまで目安であり、実際に切削していないエアカットの時間も加工中とみなすため、正確に補正することができない。他の補正手法としては、加工中に工作物の寸法を直接測定し、所定の寸法になるように切り込みを制御する手法、実験的あるいは解析的に求めた加工精度の数学モデルに基づいて切り込みを補正する手法がある。

一方、旋盤において、加工中の工作物の寸法を直接測定し、所定の寸法になるように切り込みを制御する手法が研究されている^[70]。この手法は加工誤差に関する要因分析なしに精度補正が可能であるが、工作物形状によっては寸法測定が困難であったり、切りくず、冷却水、構成刃先などが制御系に外乱をもたらす可能性がある。

また、工具摩耗のモデルを用いて補正する手法として、加工シミュレーションを用いて切削面積から摩耗量を推定し、加工誤差を補正する手法が提案されている^[71]。この手法は、ソフトウェア的な処理だけであり、工作物形状や切削状況に関わらず精度補正が可能

である。推定の精度を上げるため、実際に切削して測定した摩耗をモデル化するためのさまざまな測定が行われている^[72]。さらに、工具の摩耗現象を切削理論アルゴリズムとニューラルネットワークを用いて工具摩耗の進行による切削状態の変化を予測し、工具経路を補正する手法が提案されている^[73]。

一方、CAMシステムにおいて、工具摩耗などを事前に加工時間より推定し、工具形状を変形させて工具摩耗を補正した工具経路を生成する手法も提案されている^[74]。

加工中に発生する熱や振動などのさまざまな物理要因に対応するためには、リアルタイムでの補正や能動的な補正が有効であるが、リアルタイムでの測定や補正の処理速度の問題、さらには装置の付加による工作機械の大型化によるコストの問題からも実用化は難しい。これらの補正には、誤差を予測して補正する手法が簡単で、この手法によりコストと精度の関係より実用的であると考えられる。しかし、現在のCNC装置にはこのような補正データの入力ポートがないため、補正の単位はNCプログラムの1ブロック毎での補正しかできず、実際にリアルタイムで駆動しているサーボサンプリングでの時間に比べて応答性が低下し、十分な補正ができない。

また、誤差量を予測するためには、事前にNC加工シミュレーションを行い、誤差予測を行う必要がある。しかし、単位時間当たりの除去量を求める際に用いられる形状モデルは、CAD/CAMシステムで用いられる形状モデルと異なるため、加工シミュレーションで得られたさまざまな結果を、CAMシステムに直接反映できないため、十分な補正ができない。

さらに、従来の研究では、熱変形や弾性変形といった、加工に影響を与える個々の物理現象の予測を行うための手法が個別に検討されてきた。しかしながら、実際の加工においては、これらの現象は複数の要素が複雑に絡み合っている現象であり、単一の相における解析のみによっては正確な予測が行えない。これらの複合誤差に関する研究の必要性は提唱されている^[75]が具体的に取り組むには至っていない。あわせて、高速高精度加工システムを実現するためのさまざまな補正がCAMシステム、CNC装置、サーボシステム、工作機械というように、メーカー毎に補正が各メーカーにおいて個別に行われているため、補正の情報が十分伝わらず、補正の精度を低減させている。

そこで、本論文ではCAD/CAMシステムから直接サーボデータを生成すると共に、サーボデータ単位で精度の高い指令軌跡を生成する手法を新たに提案している。また、高速高精度加工を妨げる要因を補正する手法として、NC加工シミュレーションによって加工後のさまざまな加工誤差をサーボデータ単位で補正する手法を提案している。

提案する加工システムと加工誤差補正の手法については、第7章で述べる。ここで、加工誤差補正の対象として、工作機械に起因する誤差としては、誤差が顕著に現れる運動誤差を対象として、補正処理を行った。

参考文献

- [1]松浦甫篁：高速ミーリングの要件と課題，機械技術，第47巻，第9号(1999)，pp.28
- [2]百池武：送り速度で能率を上げる高速加工，型技術，第15巻，35号(2000)，pp.58
- [3]高橋，安斎，中川：10万回転超高速ミーリングにおける超硬小径ボールエンドミルの摩耗特性，精密工学会誌，第65巻，第6号(1999)，pp.867-871
- [4]岩田，松本：樹脂型向けシステムの開発と適用，型技術，第14巻，第8号(1998)，pp.49
- [5]岩部洋育：型作りにおける高速切削加工，型技術，第15巻，第1号(2000)，pp.38
- [6]青山英樹：99年の3次元CAD/CAMの動向，型技術，第14巻，第8号(1999)，pp.35
- [7]戸沢幸一：高速・高精度加工による自動車用大物金型の製作リードタイム短縮，型技術，第15巻，第3号(2000)，pp.31
- [8]井上久仁子：CADとCAMの結合，精密工学会誌，Vol.60，4(1994)，pp.497-501
- [9]木村文彦：STEPと産業オートメーション，精密工学会誌，Vol.59，12(1993)，pp.5
- [10]小堀研一，春日久美子：基礎から学ぶ図形処理，工学調査会，1996，pp.158
- [11]牟田芳喜：オフセット交線計算による曲面表現経路を用いた曲線補間加工技術，機械と工具，2月号(1998)，pp.18
- [12]福井，高橋，大坪：高速・高能率切削加工の研究－加工面性状におよぼす要因－，1999年度精密工学会秋季大会講演論文集，pp.163
- [13]香村章夫：高速・高精度加工用「FF/CAM」，機械技術，第47巻，第4号(1999)，pp.37
- [14]中尾健二：金型荒取り加工の新技术－一発大荒・カケ上がり加工－，機械と工具，1998年，3月号，pp.51-56
- [15]宮田光人，佐々木隆夫：高速切削ニーズに対してCNC制御装置はどう対応しているか，機械技術，第43号，第7号(1995)，pp.48-55
- [16]福井雅彦：高速加工とNCについて，型技術，第14巻，第8号(1998)，pp.22
- [17]長島一男，広瀬敏之：NC工作機械の工具移動軌跡に生ずる誤差とその入力適応系，日本機械学会論文集C偏，第65巻，638(1999)，pp.4230-4236
- [18]山口隆宏，日置克也：スーパーHI²-NCによる高次曲線加工の実現技術，機械と工具，2月号(1998)，pp.23-29
- [19]島淳：NURBS補間とCAD/CAM，機械技術，第46巻，第1号(1998)，pp.52
- [20]鈴木裕：曲線補間，NURBS補間は有効か，型技術，第13巻，第9号(1998)，pp.26
- [21]福井雅彦ほか：3次元高速高能率切削加工－CAMデータと実送り速度－，1997年度精密工学会秋季大会講演論文集，pp.57
- [22]山崎，瀬戸，堤：NC工作機械送り駆動系の円精度向上に関する研究－加減速指令の一設計法－，1999年度精密工学会春季大会講演論文集，pp.163
- [23]三浦靖，富塚誠義：工作機械送り駆動系のフィードフォワード及び繰り返し制御，システム制御情報学会論文誌，2-1(1989)，pp.261-267
- [24]中村裕司：高速高精度加工のための予見学習サーボ制御機器，精密工学会誌，Vol.59，9(1993)，pp.1431-1434
- [25]竹下虎男，風間努，加知光康：CNCサーボシステムの性能向上に関する研究(NCサーボ追従性改善の一方法)，日本機械学会論文集C偏，第63巻，615(1997)，pp.3870-3875
- [26]藤野輝興：サーボ誤差をなくした高速高精度軌跡制御，日本機械学会論文集C偏，第56巻，527(1990)，pp.1805
- [27]是田，沖友ほか：修正逆伝達関数制御による工作機械の送りの高速化に関する研究，精密工学会誌，Vol.60，8(1994)，pp.13477-1358
- [28]松原，垣野，桜間：構造振動を考慮したリニアモータサーボ系の設計－現代制御理論を用いた安定化保証器の設計－，1999年度精密工学会秋季大会講演論文集，pp.170

- [29]山崎, 堤: 送り駆動系への H_{∞} 制御の適用, 1999年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 516
- [30]佐藤, 科野ほか: 各種制御法を用いた送りネジ位置決め系の性能評価(第2報) — ステップ高さや質量の変化と定常負荷外乱の影響 —, 精密工学会誌, Vol. 63, 12(1997), pp. 1759-1763
- [31]佐藤, 田川, 堤ほか: オフライン制御シミュレーションによる精密軌道制御のための修正目標値生成, 1999年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 102
- [32]陳, 堤ほか: 自律制御システムによるCNC工作機械の送り駆動精度の安定化手法(ニューラルネットワークを使用した手法), 日本機械学会論文集C偏, 第61巻, 591(1995), pp. 4504-4509
- [33]阿部川, 大前: 軌跡フィードバック型多軸サーボシステムの基礎検討, 1999年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 162
- [34]二見, 中村ほか: 予測制御による高速位置決め, 1994年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 35
- [35]貝原紘一: 金型用超高速加工機「Aシリーズ」の特徴と加工例, 型技術, 第13巻, 3(1998), pp. 43-47
- [36]藪本知巳: 高速加工機に求められる性能と有効活用法, 機械技術, 第47巻, 第9号(1999), pp. 35
- [37]嶽岡悦雄: 高速ミーリングの基礎と難削材への適用, 型技術, 第15巻, 第3号(2000), pp. 28
- [38]瀬戸, 山崎, 堤: NC工作機械送り駆動系の円精度向上に関する研究 — 半径減少およびステックモーションの補正 —, 1999年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 164
- [39]垣野, 羽山ほか: 駆動力付加によるNC工作機械送り系のステックモーション補正, 1998年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 209
- [40]是田, 沖友ほか: バンバン制御による工作機械送りの高精度化に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 60, 3(1994), pp. 427-431
- [41]羽山, 伊藤, 垣野ほか: NC工作機械送り駆動系における漸増形ロストモーションの生成機構とその補正に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 62, 2(1996), pp. 247-251
- [42]太田秀仁: 高速加工機に求められる性能と有効活用法, 機械技術, 第47巻, 第9号(1999), pp. 41
- [43]稲崎一郎: 工作機械における形状創成理論の体系化と応用, 日本機械学会論文集C偏, 第60巻, 574(1994), pp. 1891-1895
- [44] J. Bryan: International Status of Thermal Error Research (1990), Annals of the CIRP, 39-2, pp. 645
- [45] 田辺郁男, 高田孝次: レジンコンクリート構造工作機械の熱変形(第2報) 室温変動に対するコンクリートベッドの熱的挙動, 日本機械学会論文集C偏, 第58巻, 549(1992), pp. 1655-1661
- [46]小林, 渡部ほか: 工作機械の温度特性行列の同定(第1報) 熱が一次元的に流れる断熱構造物に対する同定法の提案, 日本機械学会論文集C偏, 第58巻, 549(1992), pp. 1648-1654
- [47] G. Spur: Thermal Behavior Optimization of Machine Tools using Design Measures and Compensatory Techniques, Proc. 4th IMEC, Japan, (1990), pp. 3
- [48]光石, 奥村, 長尾ほか: ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムとを用いた高精度マシニングセンタの開発, 日本機械学会論文集C偏, 第61巻, 591(1995), pp. 4517-4522
- [49]森脇, 社本ほか: ニューラルネットワークによる工作機械の熱変形予測(機械表面温度の時間履歴を考慮することによる予測精度の向上), 日本機械学会論文集C偏, 第61巻, 584(1995), pp. 1691-1696
- [50]松尾, 安井ほか: マシニングセンタの温度分布測定による熱変位補正(第1報) — 温度・熱変位数学モデルの同定 —, 精密工学会誌, Vol. 57, 3(1991), pp. 550-555

- [51]松尾, 安井ほか: マシニングセンタの温度分布測定による熱変位補正 (第2報) —NC制御装置のピッチ誤差補正機能等を利用した自動補正—, 精密工学会誌, Vol.57, 6 (1991), pp.1066-1071
- [52]陳, 堤ほか: CNC工作機械の位置決め精度に関する研究, 日本機械学会論文集C偏, 第62巻, 599(1996), pp.2686-2691
- [53]森脇, 社本ほか: 周囲気温変化による超精密工作機械の熱変形 (伝達関数による熱変形特性の検討とたたみこみ積分による推定), 日本機械学会論文集C偏, 第63巻, 615 (1997), pp.4025-4030
- [54]田辺, 水谷ほか: 工作機械のカラーリングがその熱変形に及ぼす影響, 日本機械学会論文集C偏, 第60巻, 580(1994), pp.4361-4367
- [55]田辺郁男, 李鍾斗: 工作機械のカラーリングがその熱変形に及ぼす影響 (実機による評価と外装板金がある場合の検討), 日本機械学会論文集C偏, 第64巻, 620 (1998), pp.1456-1463
- [56]平尾, 白瀬, 安井ほか: 高速切削における切削熱の挙動に関する研究, 精密工学会誌, Vol.64, 7 (1998), pp.1061-1071
- [57]朝比奈, 横山, 古川: 加工精度予測可能なパーソナルCAD/CAMシステムの開発 (エンドミルによる端面加工の場合), 日本機械学会論文集C偏, 第61巻, 588(1995), pp.3423-3429
- [58]岩部, 島田, 横山: 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偏, 第63巻, 599(1997), pp.239-246
- [59]岩部, 竹本, 今井: エンドミルによる高速加工に関する研究 (輪郭加工による加工精度と誤差要因), 日本機械学会論文集C偏, 第63巻, 612(1997), pp.2878-2885
- [60]成田, 白瀬, 若松, 荒井: バ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, 2000年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.55
- [61]大木, 近藤, 齋藤ほか: エンドミル切削加工における加工誤差の先行予測に関する研究 (第3報) —加工誤差を考慮した加工—, 1994年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.531
- [62]赤沢, 白瀬, 若松, 荒井: NCプログラムを必要としない自律型・知能型の旋盤の開発, 2000年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.115
- [63]碓井雄一, 澤井信重: 切削力によって生じるエンドミルのたわみの補正, 1998年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.582
- [64]斉藤, 丸山ほか: 実時間補償制御の研究 (第1報) —オープンNC装置の試作—, 1997年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.1137
- [65]富, 李, 光石, 長尾: オープンアーキテクチャCNCマシニング・センタを用いた曲面の知能化加工の研究—工具曲げ変形による加工誤差の補償—, 1998年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.345
- [66]白瀬, 安井ほか: エンドミル加工におけるびびり振動の解析と制御, 1997年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.593
- [67]佐野, 白瀬, 平尾, 安井: エンドミル加工におけるびびり振動の解析, 1996年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.151
- [68]松田, 松原ほか: 新しい能動的びびり振動制御方法について, 1996年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.153
- [69]白瀬, 安井ほか: エンドミル加工におけるびびり振動の解析と抑制 (第1報) —時間領域切削シミュレーションによる不等ピッチエンドミルのびびり振動解析—, 精密工学会誌, Vol.64, 3 (1998), pp.465-469
- [70]川野, 面田ほか: インプロセス計測加工精度補償の研究, 精密工学会誌, Vol.64, 8 (1988), pp.1463-1468
- [71]香山, 近藤, 金子, 五十嵐: ボールエンドミルの摩耗推定に関する研究, 2000年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.313

-
- [72] 森脇ほか：切削力モデルに基づくエンドミル工具の摩耗量推定に関する研究（第2報）データベースを用いない手法の検討，1998年度精密工学会春季大会講演論文集，pp. 99
- [73] 松村隆，白井英治：工具摩耗を考慮した旋削作業の加工精度補償システム，日本機械学会論文集C偏，第63巻，615（1997），pp. 4031-4036
- [74] 佐藤，檜原，鈴木，神谷：工具刃先精度を考慮した工具経路の算出手法の開発，1997年度精密工学会春季大会講演論文集，pp. 525
- [75] 金子，寺本，小野里：物理現象の多相性を考慮したプロセスシミュレーションに関する研究，1998年度精密工学会秋季大会講演論文集，pp. 31

第 3 章

Boundary-Map 形状モデルの開発

3. 1 はじめに

コンピュータを始めとする電気電子・メカトロニクス技術および情報技術(Information Technology)の発展と共に、これらの技術は設計開発はもとより製品評価や生産システムの設計からシミュレーションによる評価に至るまで、製造業において幅広く利用されている。CAD/CAMシステムは、製造業における設計生産の中心的存在であり、このシステムの性能が生産性の向上、コスト低減、開発の短期化に大きく貢献する。さらに、CAD/CAMシステムの中核をなす技術は、対象となる製品をコンピュータ内に表現するモデリング技術であり、このモデリング(Geometric Modeling)技術の性能はCAD/CAMシステムの性能を左右するほど、重要な位置を占めている。

設計から生産の過程における形状の幾何情報は、従来は図面という2次元情報を基に利用者の頭の中で3次元化されてきていた。しかし、近年要求される形状は年々複雑化しており、もはや人手で加工情報やメッシュ情報を生成することは不可能となってきた。そこで、3次元形状をコンピュータ内に数値化して表現する手法である形状モデル(Geometric Model)が、様々な分野で研究されるとともにシステム開発が行われ、実用化されている。これらの形状モデルは用途に応じて多様な形態を持っているが、製造業における設計・生産加工の分野では、要求される加工精度と処理速度を満足することができる形状モデルが要求される。また、CAD/CAM/CAEシステムにおいては、図面作成、マスマプロパティ計算、有限要素メッシュ作成、機構解析、加工や組み立てのシミュレーションと干渉チェック、加工情報の生成、リアルなCG(Computer Graphics)表現などさまざまな機能が要求される^[76]。

コンピュータを用いて図形を取り扱う試みは1950年代の数値制御装置(Numerical Control)システムの開発と共に始まり、形状定義と運動定義を持つAPT(Automatically Programmed Tools)システムとして、幾何情報を用い工具の経路情報を算出するという、現在のCAD/CAMシステムの基本構成が形作られた^[77]。しかし、APTは、形状モデリングという概念はほとんどなく、幾何形状は工具経路を決める手段としてのみ用いられていた。その後、コンピュータの発展と共に、形状を精度良くコンピュータに定義するという要求は高度化し、現在は3次元立体を内部情報をも含め正確に表現できるソリッドモデルが主流となっている^{[78][79]}。ソリッドモデルは、サーフェイスモデルでの面情報に加えて、面のどちら側に実体があるかの情報をコンピュータ内に定義したものである。サーフェイスモデルに比べて干渉チェック、形状モデルの体積や重心を求めるマスマプロパティ計算、組み立てシミュレーション、有限要素解析のための要素分割など、加工に必要とされる情報の演算が可能となるため、CAD/CAMシステムでの形状モデルとして多用されている^[80]。

ソリッドモデルの研究は、1973年の国際会議PROLAMATにおいて、北海道大学の沖野教郎がTIPS-1^[81]を、英国ケンブリッジ大学のI.C.BraidがBUILD^[82]を発表したことがきっかけとなった。この会議において、形状をコンピュータ内の内部モデルとして扱う形状モデリングが提案されると共に、さまざまな形状モデルの研究が始められた。形状モデルに関する研究が進められる中、1982年にロチェスター大学の

A. A. G. RequichaとH. B. Volelekerが実施した調査報告書の中で、ソリッドモデルの内部モデルとして、B-R e p s (Boundary Representation)とC S G (Construction Solid Geometry)というキーワードを用いて形状モデルを分類したことにより、形状モデルの表現手法が定義された。

従来から、さまざまな形状モデルが研究開発されてきたが、現在の汎用C A Dにおける形状モデルは数種類のカーネルとして集約されつつある。現在利用されている主な形状モデルカーネルには、Parasolid(米Unigraphics Solutions社)、ACIS(仏Dassault Systemes, 旧米Spatial Technology社)、DESIGNEBASE(Ricoh社)があり、ソリッドモデルをベースに曲面表現などにサーフェイスモデルを用いている。これらの形状モデルは、形状の高精度な表現を主体としているため、C A Mシステムの形状モデルとして利用するには、高速な干渉チェックや工具経路生成処理が必要となるため、C A Mシステム内部でC A Mシステムに適した形状モデルに変換して用いる場合が多い。

本章では、C A Mシステムに適し、C A MシステムからN C加工シミュレーションまで統一して利用できる形状モデルを新たに提案すると共に、データ構造と特徴について述べる。また、形状モデルの表現精度、使用メモリ容量について検証を行った結果について述べる。

3. 2 ソリッドモデル

3. 2. 1 CSGとB-Rep s

TIPS-1に採用されたCSGはプリミティブと呼ばれる基本立体を定義し、これを集合演算によって組み合わせることで立体を表現する手法である。一方、BUILDに採用されたB-Rep sでは立体定義はプリミティブの集合演算によって行われるが、立体はその境界面で表現され、システム内にその面の幾何情報 (Geometric) と面の関係を示す位相情報 (Topology) を保持することにより形状を表現している。この手法は、立体のデータを直接持っているので描画処理は速い。さらに、B-Rep sではWinged-edge構造^[83]を採用することによって、データ構造を簡素化すると共に、形状の変形にオイラー操作^[84]を用いることで立体の持つ位相構造の正当性を保証している。CSGおよびB-Rep sによる形状表現の概念をそれぞれ図3. 1に示す。

図3. 1に示す形状を表現する場合、CSGではプリミティブ形状の論理演算式によって形状を表現するため、データを表現する式は形状の定義と共に形状の生成手順をも示している。このため、形状の変更が容易である長所を持つ。しかし、形状のグラフィック表示に時間を要することや形状の局所修正が困難なこと、そして自由曲面を定義することが困難であることが短所である。一方、B-Rep sはデータ構造が複雑になり、自己干渉した形状を定義できてしまうという欠点を持つが、形状のグラフィック表示が速いことや局所変形が容易であることなどの長所を持つ。現在使用されている形状モデルは、B-Rep sを主体とした物が多く、補助的に定義空間での形状の有無やフィーチャー定義などにCSGモデルを利用したハイブリッドシステムが多い^{[85][86]}。

その他の形状モデルの表現方法としてセル分割法 (Cell Decomposition) や空間格子

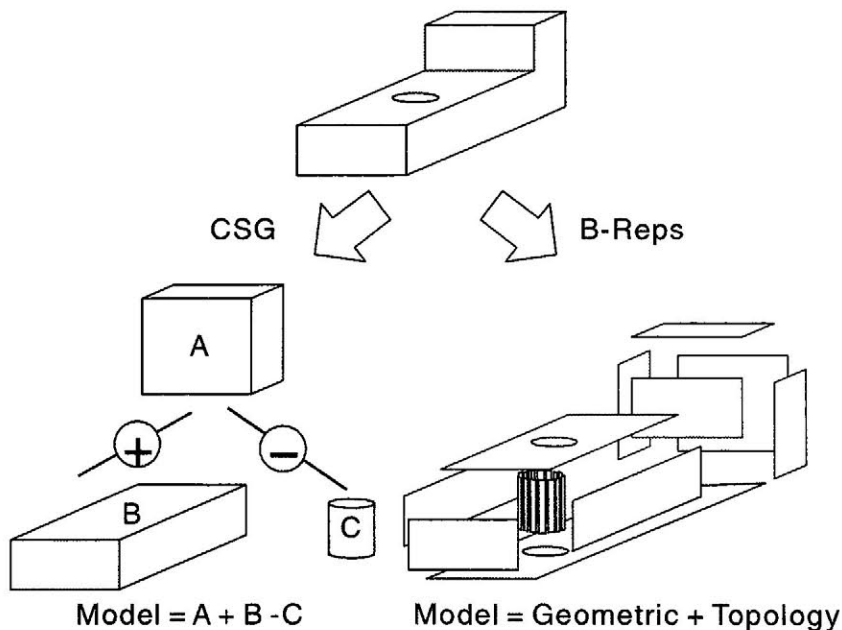


図3. 1 CSGおよびB-Rep s表現の概念

法 (Spatial-Occupancy Enumeration) に代表されるような、形状を離散化して表現する Spatial-Partitioning Representations 法がある^{[87][88]}。セル分割法では立体を四面体などの単純なセルと呼ばれる基本形状に分解して表現する。立体がセルの集合体として表現できるので、体積計算や慣性モーメント計算などのマスペロパティ計算が容易である。また、構造解析で必要となるメッシュを表現するには適している。空間格子法は、空間を小さな立方体 (Voxel) に区切り、形状が立方体を占めるかを 0, 1 により表現する。この方法は干渉計算が高速に行えるという特徴を持つが曲面も立方体で表現するために、精度よく表現するためには膨大なメモリを必要とする。

形状を離散化する方法は単独で形状表現するには形状の表現能力に問題があるが、CSG や B-Rep s と併用することで干渉計算などの処理速度向上に利用されている^[89]。また、この手法はそれほど精度を必要としない場合、例えば医療で用いられる CT や MRI などの画像データから立体を表現したり、手術のシミュレーション等に用いられている^[90]。しかし、近年のコンピュータの処理能力向上、およびメモリーの低価格化により、高速な干渉チェックが可能であり、離散化による高速な計算が可能なこの手法は有限要素メッシュ生成や自由曲面加工用 CAM システム、さらに加工シミュレーションなどの商用システムに利用されるようになってきている^{[92][93][94]}。

表 3. 1 に、現在のソリッドモデルの代表的表現法である、CSG, B-Rep s, 空間格子法についての長所と短所を列挙する^{[95][96][97]}。

表 3. 1 形状モデルの長所短所

形状モデル	長 所	短 所
CSG	データ構造が簡単 データ量が少ない 形状の正当性が保証される B-Rep への変換可能 変形のやり直しが簡単	局所変形が困難 曲面の表現が困難 グラフィック表示が遅い 工具経路生成複雑 図面化が困難
B-Rep	局所変形が容易 曲面の表現が容易 グラフィック表示が高速 工具経路生成簡単 図面化が容易	データ構造が複雑 データ量が多い 形状の正当性が保証されない CSG への変換が困難
空間格子	データ構造が簡単 形状は空間一意性を持つ 工具経路生成が簡単 形状処理が簡単 干渉チェックが高速 マスペロパティ計算が容易	精度を上げるとデータ量膨大 他のモデルへの変換が困難 データ量が姿勢に依存する

3. 2. 2 空間格子モデル

形状データを離散化してコンピュータ内に形状モデルとして格納する空間格子モデルの考え方は、医療で用いられる2次元の積層画像データを3次元表示するボリュームレンダリング技術^[98]を中心に開発が行われてきた^{[99][100]}。これらの開発を通して、空間格子モデルの形状処理が単純なアルゴリズムで行えることや、簡単に干渉チェックが行えるなどの特徴が注目され、次第にCAD/CAMシステムやNC加工シミュレーションにおいて利用されるようになってきた^[101]。

空間格子モデルには、定義空間を必要分解能で分割した直方体の集合体とするVoxel^[102]やBit-Map^{[103][104]}データを基本とした形状モデルがある。また、使用メモリの低減と精度の向上を目的として、形状の複雑さに応じて直方体の大きさを可変にしたOctreeデータ^{[105][106]}が利用されている。VoxelとOctreeの概念を図3.2に示す。Voxelは均一の立方体であるVoxelにより形状が表現されているため、形状の表現が簡単であることにより高速処理が可能である。

Octreeは、精度が要求される箇所は小さい立方体、精度が必要ない箇所は大きい立方体で表現するため、使用メモリの低減と精度の向上を図ることができるが、形状処理が複雑となる。空間格子モデルは、主にNC加工シミュレーション^[107]や有限要素解析メッシュ生成、光造形システム^[108]に用いられているが、精度を向上させようとする膨大なメモリ容量を必要とすることや形状の姿勢によりメモリ容量が極端に増減することなどの問題点を有している^[109]。

また、加工業における生産対象の多くが、Z方向に一つの高さを持つ形状、すなわちオーバハングの無い形状が多いことから、XY平面を2次元格子で区切り、各格子にお

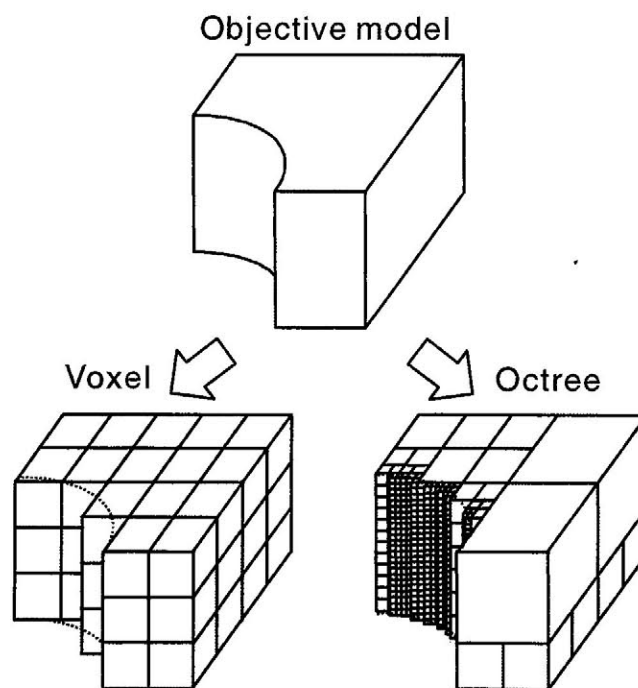


図3.2 VoxelモデルとOctreeモデルの概念

るZの高さに注目したZ-Map^[110]やデクセル(Dexel)^[111]が用いられている。Z-Mapとデクセルの概念図を図3.3に示す。

これらの基本的な考え方は同じであるが、Z-Mapが厚さを持たないのに対し、デクセル格子間隔幅の厚みを持つ。Z-Mapとデクセルのいずれの手法も、X、Y方向の精度を向上させるためには格子間隔を細かくする必要がある。しかし、格子間隔を細かくするとメモリ容量が増大する問題が生じる。このメモリ容量と精度の問題点を解決するために、Octreeと同様に格子間隔に対しQuad-tree構造を採用し、格子間隔を可変にした拡張Z-Map(Enhanced Z-map)^{[112][113]}も開発されている。しかし、これらの手法は加工対象をオーバハングの無い形状としているため、スクリューのような形状に対応することができない。この問題を解決するために、XYメッシュ格子に対して、一つのZ値を保持するだけでなく、複数のZ値を持たせることにより3次元形状を表現するMulti-level Z-Map

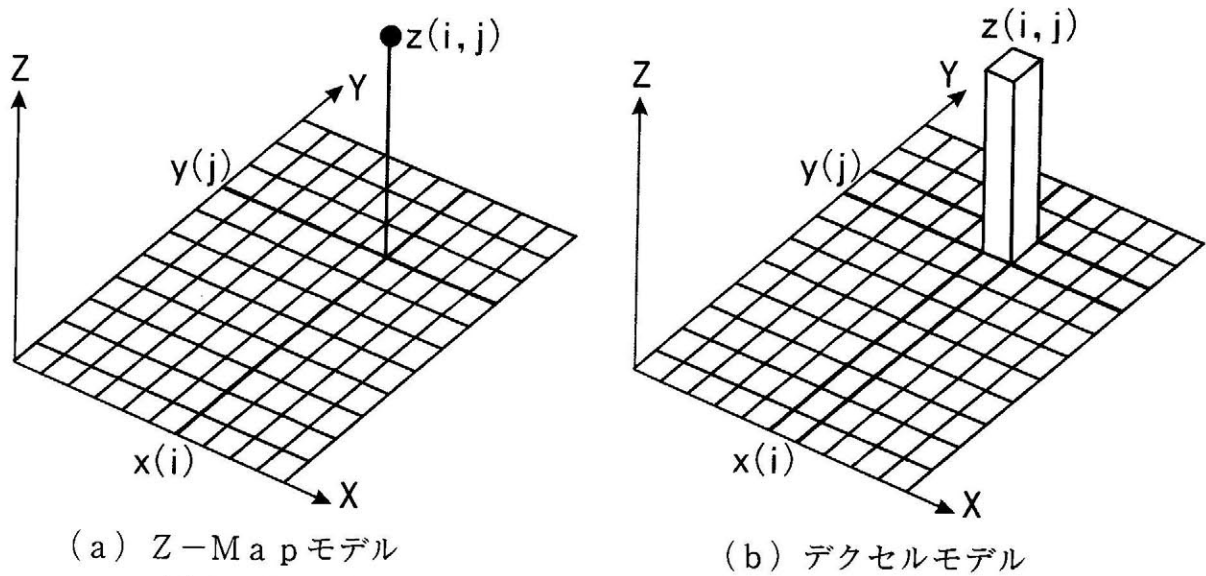


図3.3 Z-Mapモデルとデクセルモデルの概念

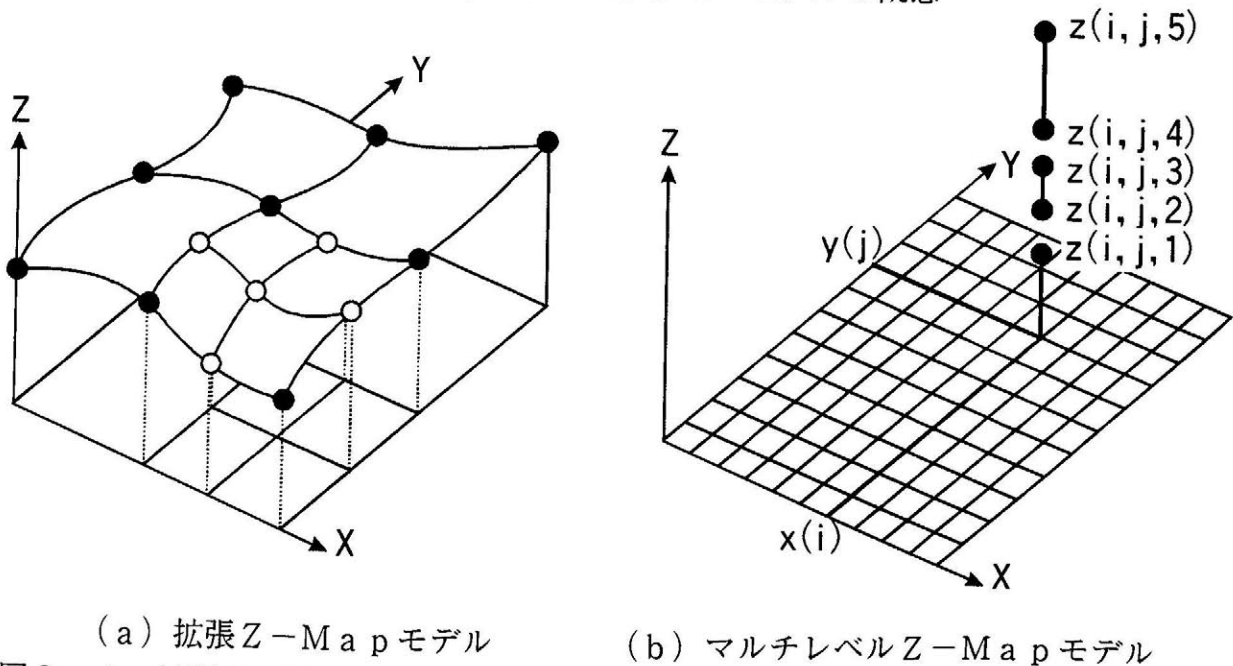
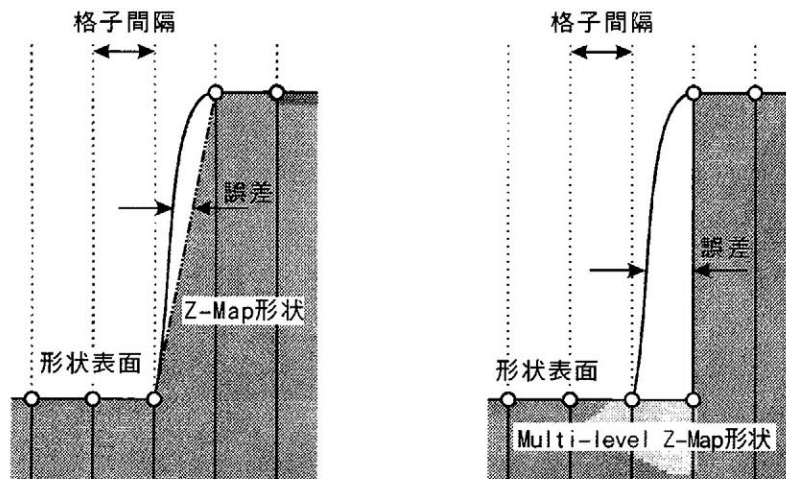


図3.4 拡張Z-MapモデルとマルチレベルZ-Mapモデルの概念

モデル^[113]に対する研究も行われている。拡張Z-MapとMulti-level Z-Mapの概念を図3.4に示す。

しかし、これらの手法はいずれもZ軸方向の高さ情報を基準にしているため、図3.5に示すような立ち壁などにおいて、形状表現があいまいとなり、表現精度が低下する。また、図3.6に示すような立ち壁箇所においては、工具との干渉チェックを行った場合、Z値だけでは干渉を判断できず、オーバカットの検出が困難となるなどの問題が生じる。しかし、これらの問題を回避するため、表現精度を向上させるには膨大なメモリ容量を必要とする。

これらの他にも、形状を細分化して各部を数式あるいは離散化して保持する、セル分割法を用いた形状モデルとしてP-map^[114]、CCM^[115]などが提案されている。また、コンピュータグラフィックスの分野において、レンダリング手法であるRaytracingやZbufferを応用したデクセル、Triple-Rayなどのモデルが提案されているが、これらの手法はディスプレイへの表示精度の向上、あるいは表示処理の高速化を目的とした手法であり、形状モデルとしての表現精度については考慮されていない^{[111][116]}。



(a) 拡張Z-Mapモデル (b) マルチレベルZ-Mapモデル
図3.5 Z-Mapモデルの立ち壁部の形状誤差

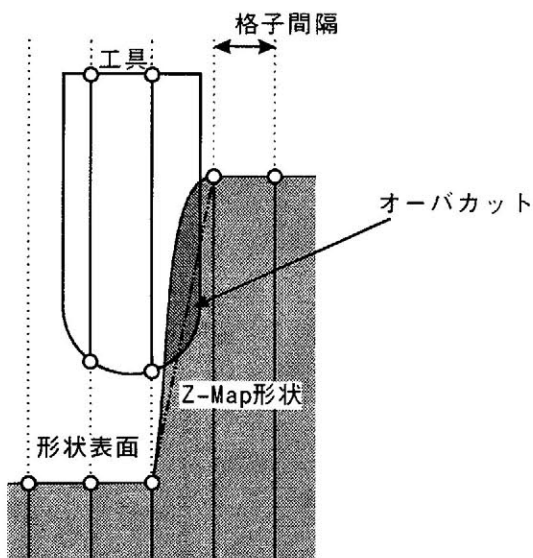


図3.6
Z-Mapモデルの立ち壁部におけるオーバカット

このように、従来から開発されてきた形状モデルはCADデータとして、形状の幾何情報を精度良く表現することを主目的として開発が行われてきたため、CAMが具備すべき機能、すなわち高速な干渉チェックや自己干渉の除去、非回転あるいは任意形状の工具への対応、多軸加工への応用が考慮されていなかった。さらに近年、高速高精度化が著しく進展している加工システムにおいて、加工中の熱変形や弾性変形などの物理現象を表現できる形状モデルが要求されているが、現状ではそのようなモデルはほとんど存在していない^[117]。

そこで、本研究では高速な干渉チェックが可能な従来の空間格子法を基本として、その欠点であった形状精度とメモリ容量の問題を解決すると共に、形状の微小変形にも対応できる形状モデルとして、新たにBoundary-Map方式を提案する。

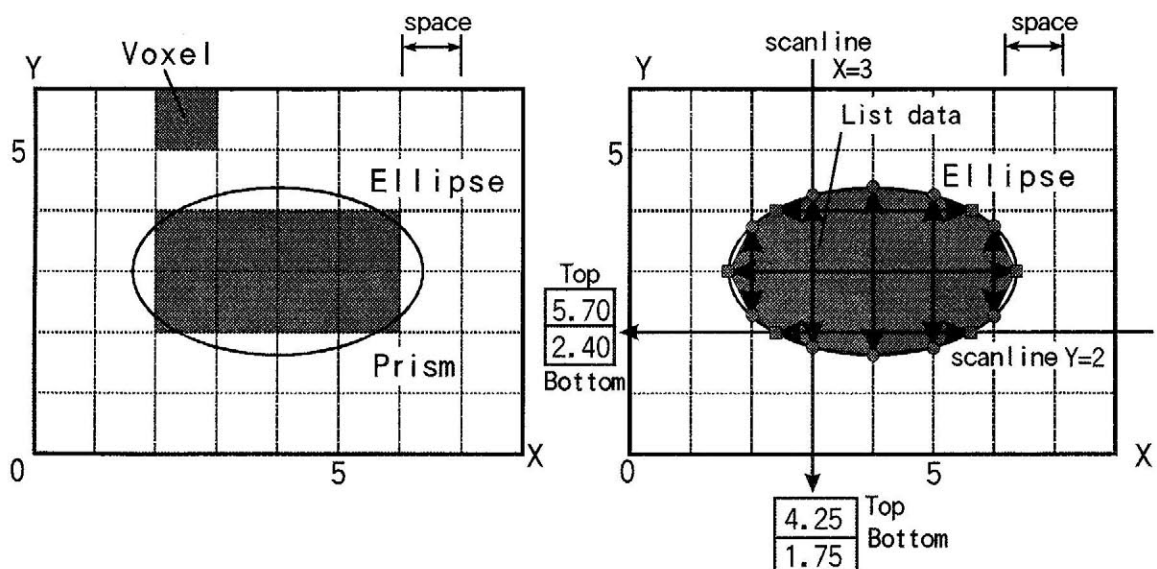
3. 3 Boundary-Map 形状モデルの概念とデータ構造

3. 3. 1 Boundary-Map 形状モデルの概念

提案する Boundary-Map 方式の形状モデルは、必要分解能で空間を分割する格子線(スキャンライン)と形状の交差する座標値を形状毎に一つのペアとして保持することにより、形状の境界情報をもとに形状を表す手法である。データ内部では座標値の大きい方を `top`、小さい方を `bottom` として定義付ける。

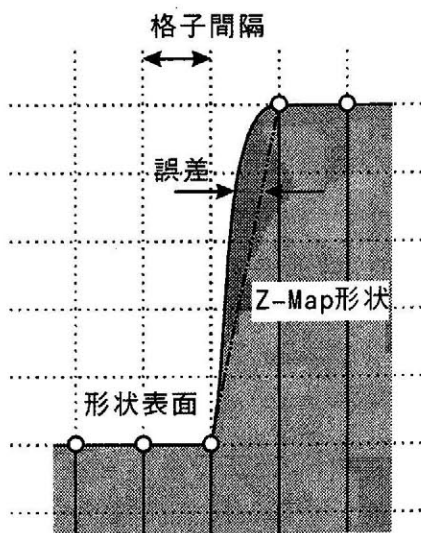
Boundary-Map 方式の概念について、空間格子法の代表的な方法である Voxel と比較しながら 2次元で説明する。図 3. 7 は、同じ格子間隔を持つ空間に同一の楕円を定義した場合の例である。図 3. 7 (a) に示すように、楕円を Voxel データで表現すると、格子が粗い場合、楕円は長方形として表現される。これに対し、図 3. 7 (b) は同じ楕円を Boundary-Map 方式で表現した図である。形状はスキャンラインとの交点の点列として表現され、定義した楕円に近い形を表現している。データの保持は、格子を構成する $x = 3$ におけるスキャンラインでは楕円と $y = 4.25$ と 1.75 で交差するので、値の大きい 4.25 を `top` として、小さい 1.75 を `bottom` として格納する。同様に、 $y = 2$ におけるスキャンラインでの値は $x = 5.7$ と 2.4 であるので、この二つの値を格納する。

このように Boundary-Map 方式ではスキャンラインと形状が交差する点の集合体で形状を表現する方法である。この手法を用いることにより、図 3. 8 (a) と (b) に示すように、Z-Map 形状表現方法と比較して、立ち壁における形状誤差は大幅に低減でき、立ち壁におけるオーバカットも図 3. 8 (c) と (d) に示すように、Z-Map に比べオーバカットを防ぐことが可能となる。

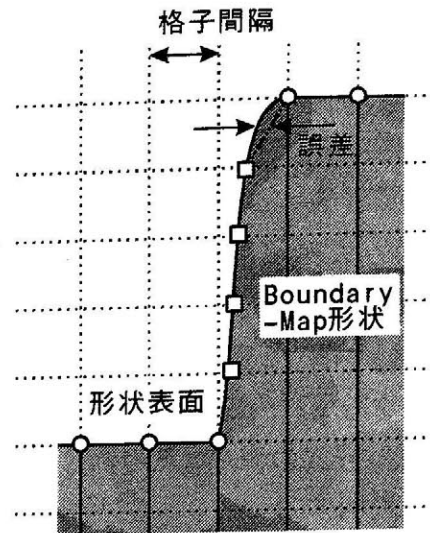


(a) Voxelモデル (b) Boundary-Mapモデル

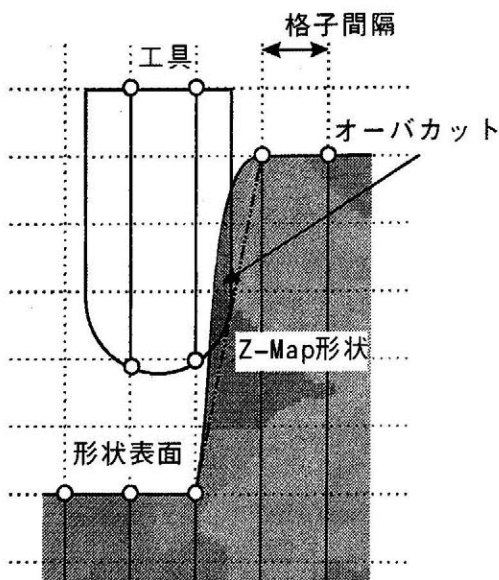
図 3. 7 Voxel データと Boundary-Map 方式の比較



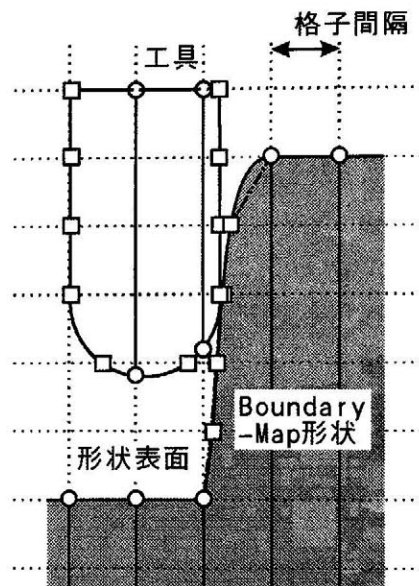
(a) Z-Map表現での立ち壁の誤差



(b) Boundary-Map表現での立ち壁の誤差



(c) Z-Map表現でのオーバーカット



(d) Boundary-Map表現でのオーバーカット

図3.8 Boundary-Mapデータ構造

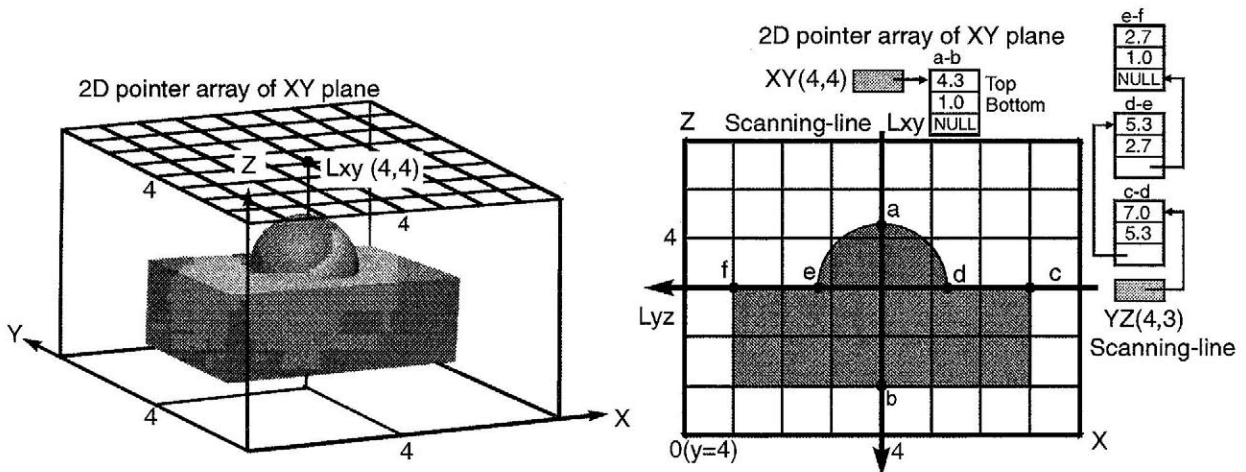
3.3.2 Boundary-Map形状モデルのデータ構造

Boundary-Map方式の形状モデルでは、格子線(スキャンライン)と形状の交差する点の座標値を保持するために、XY、YZそしてZXの平面毎にメモリ空間を用意し、交点をスキャンライン毎にリスト構造で保持している。例えば、図3.9に示す直方体と球を結合した形状の場合、定義空間を必要な分解能(格子間隔)で分割し、2次元ポイント配列をXY、YZ、ZX平面において生成する。そして、これらの格子から、それぞれZ、Y、X方向に伸ばしたスキャンラインと形状との交点座標値を求め、これらをリスト構造で保持

することにより形状を表現している。

図3.9 (a) に示すXY平面の $(x, y) = (4, 4)$ におけるスキャンライン L_{xy} は図3.9 (b) に示すように球の頂点 a と $Z = 4.3$ で交差し、直方体下端 b と $z = 1$ で交差する。この形状と交差する両端をひとつのデータセットとして、2次元ポインタ配列の $(4, 4)$ に対応づけて保持する。データ内部では座標値の大きい方を top 、小さい方を $bottom$ として定義付ける。また、図3.9 (b) に示すスキャンライン L_{yz} のように、形状と複数の交点が存在する場合には、交差するそれぞれの領域についてリストデータを構築し、順次リストに格納する。同図の場合、3つの部分 $c-d$ 、 $d-e$ 、 $e-f$ で交差しているので、これら3つの領域をリスト構造で保持する。

Boundary-Map方式では、これらのリストデータをXY, YZ, ZX平面のすべての格子におけるスキャンラインについて保持することにより3次元形状を表現する。なお、スキャンラインと形状が交差しない場合は、2次元ポインタ配列には形状が無いことを示すNULLが設定される。各リストには、図3.10に示すデータが格納される。格納されるデータは、リストの $top/bottom$ の座標値とその状態 (接触状態)、形状の色や質量等の情報を格納したルックアップテーブルのインデックス番号 (ID)、そして双方向リストポインタから構成されている。



(a) Scanning-line L_{xy} (b) Boundary-Map data structure

図3.9 Boundary-Mapデータ構造

CBmapDataList	double dTopBot[2]	リストのtop/bottom座標
	int nStatus[2]	リストのtop/bottomの状態フラグ
	int nListStatus	リストの状態
	int nListID	リストのIDインデックス
	CBmapDataList* pNext	次リストのポインタ
	CBmapDataList* pBack	前リストのポインタ

図3.10 Boundary-Mapリストデータ

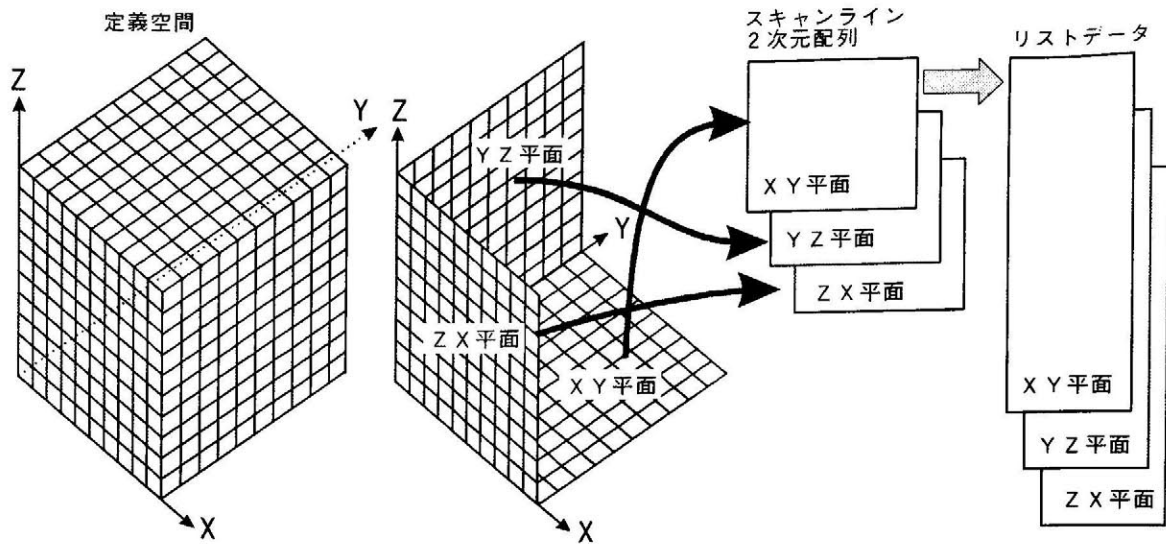


図3. 11 Boundary-Map内部データ構造

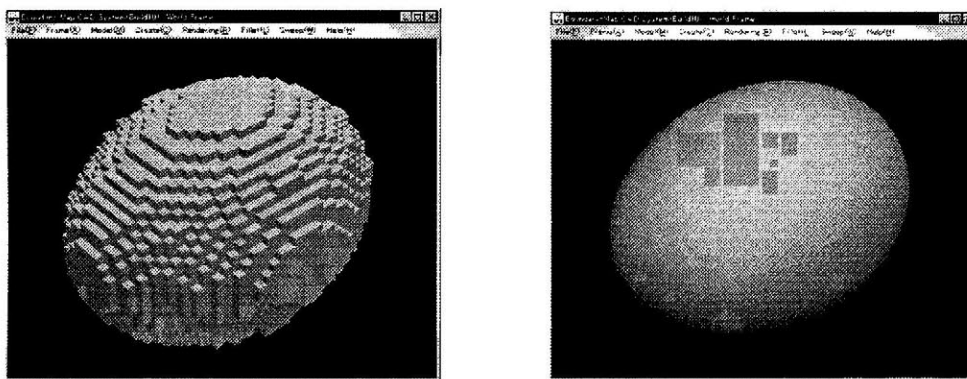
これらの形状データは、コンピュータ内のメモリ空間において、図3. 11に示すように、定義された空間を必要分解能で格子状にした後、XY、YZ、ZXの各平面の格子に関して、リストのポインタを格納するスキャンライン2次元配列としてそれぞれに設定される。そして、スキャンライン2次元配列の格子に関連づけられたリストデータもまた、平面毎にヒープ領域を確保し保存される。また、これらのデータ構造はすべてオブジェクト指向に基づいて設計されており、クラスオブジェクトにより構成されている。

3. 4 Boundary-Map 形状モデルの表現精度

3. 4. 1 Boundary-Map 形状モデルの表現精度とメモリ容量

Boundary-Map方式を用いたことにより、精度とメモリ容量がどの程度改善されるかについて、空間格子法の最も基本的なVoxel法と比較した。図3. 12 (a)はVoxel法を用いて1辺50mmの空間（格子間隔1mm）に半径20mm, 15mm, 15mmの楕円体を生成し、表示した場合の画面である。一方、図3. 12 (b)は同じ楕円体形状を同じ空間格子間隔でBoundary-Map法により表現した形状に対し表示を行った画面である。この図より、粗い空間格子であってもBoundary-Map方式を用いることにより、精度良く形状が表現できていることがわかる。

図3. 13は格子間隔を1mmとし、形状を定義している定義空間の大きさを50mmから500mmまで増やして、楕円体、球、円柱、直方体を定義空間の大きさにあわせて大きくした時の使用メモリ量を測定し、Voxel法と比較した結果である。Voxel法は、ひとつのVoxel



(a) Voxel方式による表現 (b) Boundary-Map方式による表現
 図3. 12 Boundary-Map方式とVoxel方式の形状表現の比較

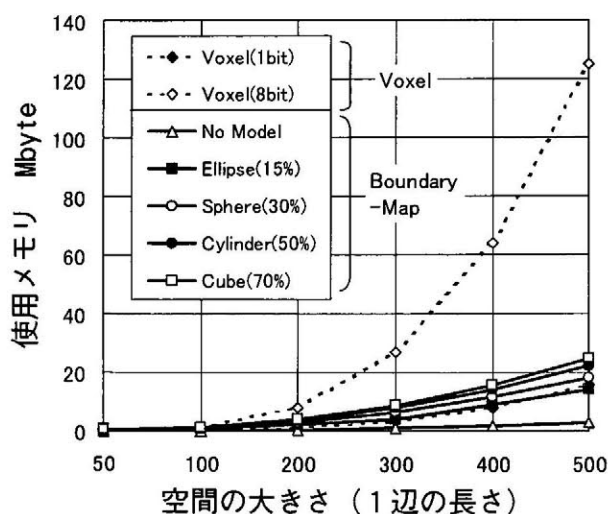


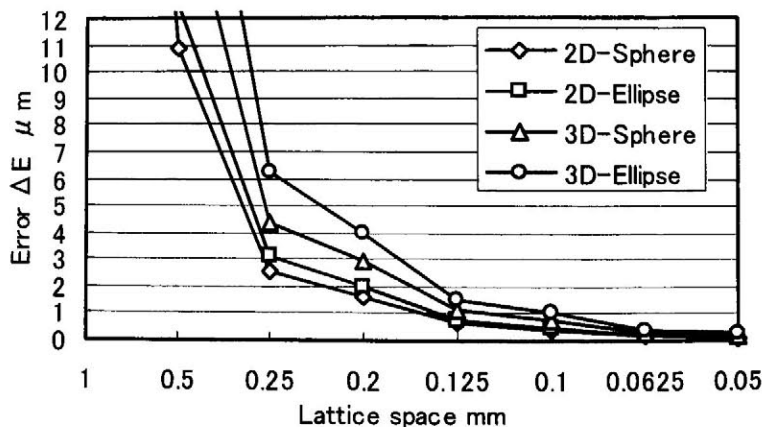
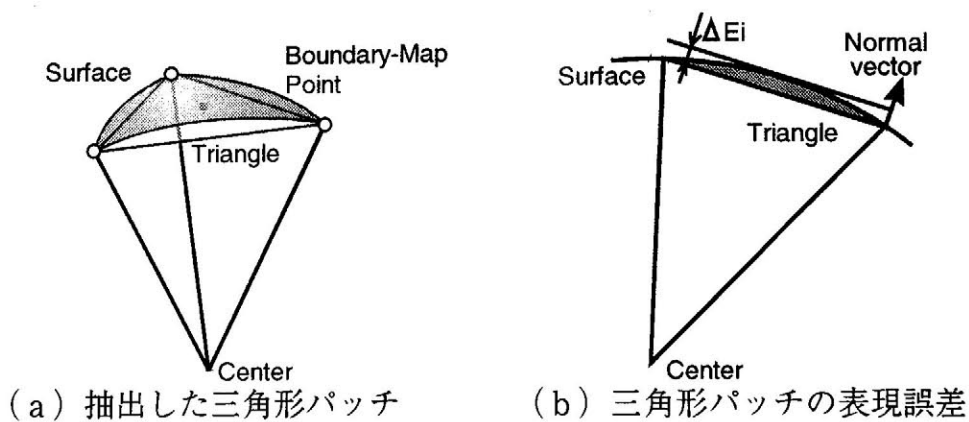
図3. 13 形状表現に必要なメモリ容量

を1 bitと、8 bitで表した場合について計算を行った。一般にVoxel法では、使用メモリは形状の複雑さに関係なく空間格子の大きさに依存しており、加工に用いる形状を表現するには最低でも8 bitは必要であるとされる。Boundary-Map方式では、形状無し、定義空間に対する対象形状の体積比を示す容積率15%の楕円体、30%の球、50%の円柱、70%の直方体の場合について比較した。

図3.13より、定義空間を大きくするとVoxel方式では使用メモリ容量が著しく増大するのに比べ、Boundary-Map方式を用いることにより、定義空間が大きくなっても使用メモリの増大は少なく、定義空間が大きくなるほどVoxelとの差は開いていくことが明らかになった。

3.4.2 格子間隔と表現精度

Boundary-Map方式における形状の表現精度を検討するため、格子間隔を変化させ、半径5 mmの球を表現した時に、Boundary-Mapで表現された形状の誤差を求めた。誤差は、Boundary-Map方式で表現された球の形状表面の境界点群から最小の三角形を取り出し、定義した球の表面との誤差を計算し、表現精度の目安とした。計算の手法は図3.14(a)、(b)に示されるように、取り出した三角形を法線方向に平行移動し、球、楕円体の表面と接した時の移動量 ΔE_i を求め、取り出したすべての三角形における移動量の最大値を誤差 ΔE とした。図3.14(c)は半径5 mmの球と、半径5 mm、5 mm、10 mmの楕円体



(c) 球と楕円体の表現誤差
 図3.14 Boundary-Map形状モデルの表現誤差

をそれぞれ2次元, 3次元で表現した時の誤差 ΔE と格子間隔との関係を表したグラフである。格子間隔は1 mm から0.05mmまで変化させた。

同図より, Boundary-Map方式を用いることによって, 半径5 mmの球の場合, 格子間隔を0.1mmにすると1 μ mの精度が得られることがわかる。この結果は, 半径5 mmの球の場合を示しており, より複雑な形状の場合は格子間隔をさらに細かくする必要があるが, Boundary-Map方式における格子間隔は要求される最小分解能より大きく設定しても比較的精度良く表現できることが明らかになった。

3. 5 Boundary-Map 形状モデルのデータ圧縮

3. 5. 1 圧縮手法

空間格子法はデータ構造上、同じ値を持つデータが多数あるため、データの圧縮がメモリ容量低減に有効である。メモリ容量を低減するのに、Voxel法ではランレングス法による圧縮やデータ構造を変形させたOctreeなどの方法が用いられている。Boundary-Map方式ではスキャンライン毎にデータを保持しているため、同一データを持っているスキャンラインをまとめることにより圧縮することができる。

例として、図3. 15に示す直方体の圧縮を考える。図3. 15(a)に示すようなXY平面において、直方体を通る3本のスキャンラインが上面とaで、下面とbで交差している場合、同じ値のリストデータを持つスキャンラインが3本作成される。これらのデータを保持するXY平面のスキャンライン2次元配列の値は、a, bの値を保持するそれぞれのリストデータを指し示している。そこで、Boundary-Map方式を用いたデータではスキャンラインのリストデータが同じ場合、図3. 15(b)に示すようにデータを指し示すポインタを同じにすることによりデータを圧縮し、データ容量を削減することができる。この例において、リストデータのメモリ容量は1/3になる。

このように、XY, YZ, ZXの各平面において同一の値を持つスキャンラインを一つのリストデータで保持することにより形状データの圧縮が可能となる。この方式で圧縮したデータは表示や、形状の編集処理においても解凍することなく取り扱える。また、図3. 15(b)の圧縮後に、同じポインタを指し示すスキャンラインのリストデータに、圧縮したリストデータをコピーすることにより、図3. 15(a)に示す圧縮前の状態に戻すことができるため、可逆性を持つといえる。

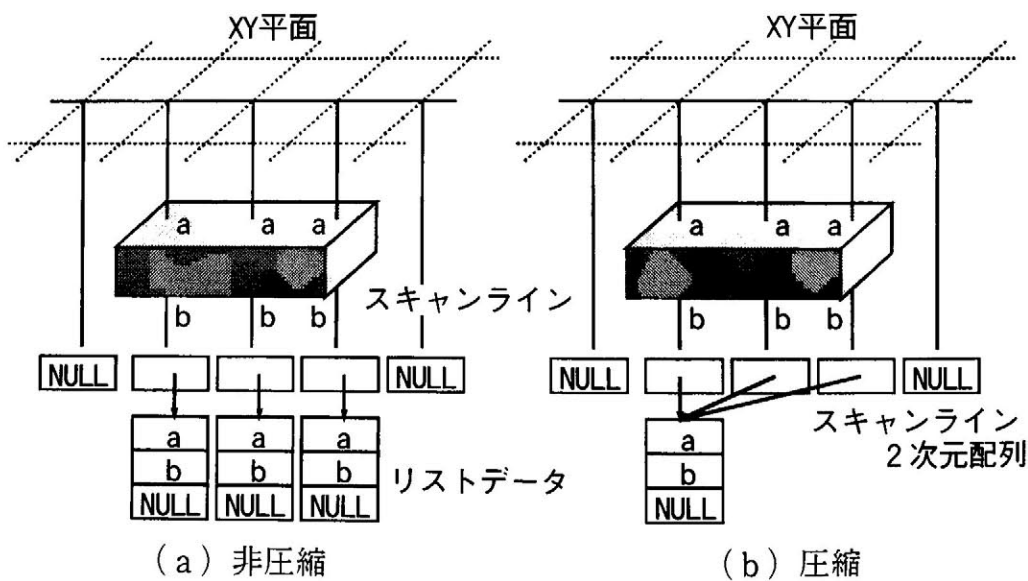


図3. 15 Boundary-Map 形状モデルの圧縮

3. 5. 2 圧縮によるメモリ容量比較

Boundary-Map方式にデータ圧縮を適用することにより、メモリ容量がどの程度低減できるかを確認するため、定義する形状と、定義空間に占める形状の割合を示す容積率を変えて、定義空間を大きくしていった時の使用メモリ容量を測定した。比較の対象として形状を定義していない場合のスキャンライン2次元配列のメモリ容量を示した。

図3. 16は定義空間に対して容積率15%の楕円体、30%の球、50%の円柱、70%の直方体を定義し、圧縮後によるメモリ容量の変化を比較した結果である。同図より、圧縮によって楕円体で3/5、球で1/3、円柱で1/5、直方体で1/5にメモリ容量が圧縮されていることがわかる。

また、図3. 17は容積率を一定の30%にした場合の円錐台、直方体、円柱、球のデー

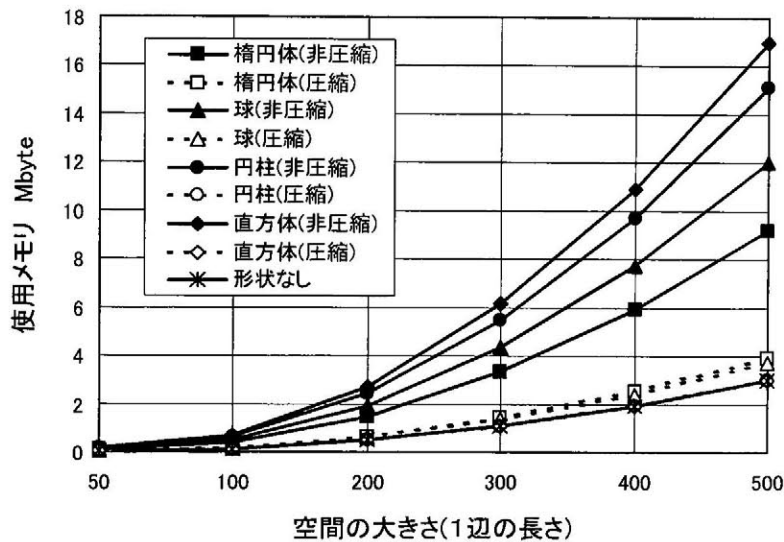


図3. 16 圧縮によるメモリ容量の比較 (容積率変化)

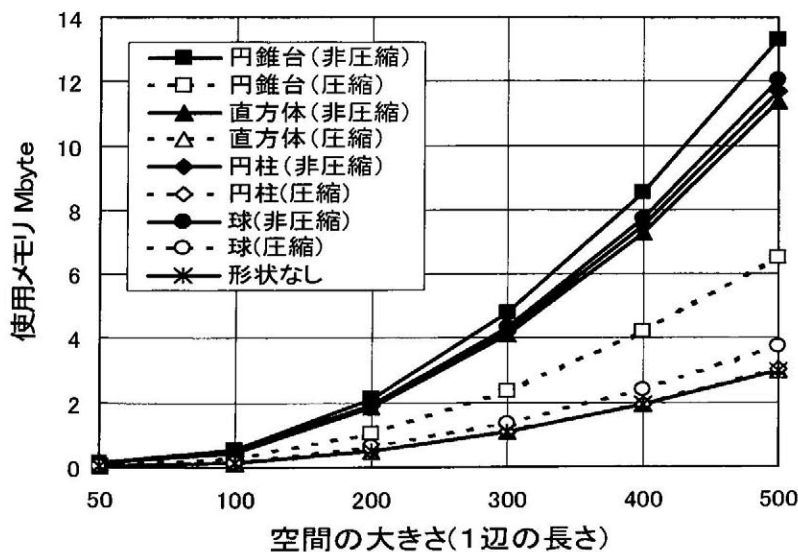


図3. 17 圧縮による使用メモリ容量の比較 (容積率固定)

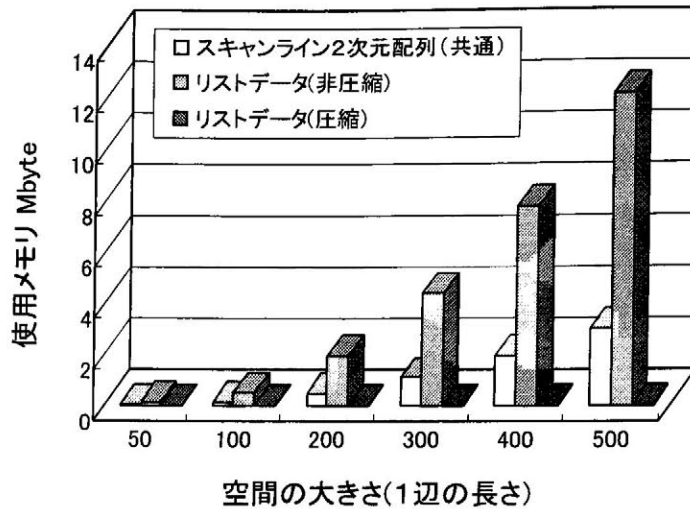


図3. 18 内部データの圧縮容量の比較

タ圧縮の有無によるメモリ容量を比較した結果である。同図より、形状の特性や複雑さにより圧縮の割合が変化しており、単純な形状ほど圧縮率は高くなっていることがわかる。最も単純な直方体の場合は約1/4に圧縮され、少し複雑な円錐台は約1/2である。

Boundary-Map方式のデータは、メモリ内において図3. 11に示すように、各平面のリストのポインタを格納するスキャンライン2次元配列と、交点情報を保持するリストデータから構成されている。図3. 18は、容積率50%の円柱にデータ圧縮を適用した場合のスキャンライン2次元配列とリストデータの圧縮による使用メモリ容量の変化を測定した結果である。同図より、データ圧縮により低減できるのはリストデータのみであり、リストデータがかなり小さくても圧縮できない2次元配列データの容量が大きいと、全体として1/5程度のデータ圧縮となっていることがわかった。このことは、Boundary-Map方式においてデータを定義する空間において形状が存在しないスキャンラインを減らすこと、すなわち、空間に対する対象形状の容積率を上げることにより、メモリ容量を低減できることを意味している。

これらのことより、Boundary-Map方式にデータ圧縮を適用すると、Voxel方式と比較して約1/10程度にデータが減少でき、さらに圧縮をかけると1/20～1/40程度に圧縮できることが明らかになった。また、圧縮の程度は形状の特性や複雑さに大きく依存し、容積率が高いほどデータの圧縮率は高くなることが明らかになった。

3. 6 総括と結論

第3章では、現在のCAD/CAMシステムで用いられている形状モデルについて、その種類と特徴、そして歴史について述べた。また、現在主流のソリッドモデルの主な形状表現方法であるCSG, B-Rep s, 空間格子モデルについて、これらのモデルの長所と短所を述べた。さらに、ソリッドモデルの中でも、高速な干渉チェックが可能で、CAM機能に有利な形状モデルである空間格子モデルについての特徴を述べた。そして、現在開発されている空間格子モデルは精度を向上させるために、膨大なメモリ容量が必要になるという問題点があることを示した。

そこで、高速な干渉チェックが可能であるという空間格子モデルの特徴を生かすと共に、高精度な形状表現が可能であるBoundary-Map方式を新たに提案し、その概念とデータ構造を示した。さらに、形状を表現するのに必要な使用メモリ容量に関して、空間格子モデルの代表的なVoxel方式と比較を行った。また、空間格子の格子間隔と表現精度の関係を球と楕円体により算出した。

さらに、データ容量を低減させる手法として、Boundary-Mapデータ構造にデータ圧縮の概念を適用し、圧縮の有無による使用メモリ容量の比較を行った。

これらの結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 空間格子モデルを基本にしたBoundary-Map形状モデルを新たに提案し、そのデータ構造を示した。Boundary-Map方式において、形状の表現にはXY, YZ, ZXの平面毎に、各格子のスキャンラインに対応したリストデータの先頭番地を格納する3つのスキャンライン2次元配列とこれらに対応したリストデータを格納するリストデータ用のヒープ領域を3つ用いることにより形状を表現している。
このデータ表現方法を用いることにより、Z-Map方式に比べてオーバハングを持つような形状であっても形状表現が可能となると共に、立ち壁における精度の劣化やオーバカットを防ぐことが可能となる。
- (2) 粗い格子間隔の空間に対して、楕円体形状をVoxel方式とBoundary-Map方式で表現し、表現精度の視覚的な比較を行った。また、楕円体、球、円柱そして直方体を定義した場合の形状表現に必要なメモリ容量の比較を行った。その結果、格子間隔が同じであるなら、Boundary-Map方式はVoxel方式と比較して高精度に少ないメモリ容量で形状が表現できることを確認した。
- (3) 空間格子の格子間隔と形状の精度を調べるため、半径が5mmの球と、半径が5mm, 10mmの楕円体を定義し、Boundary-Map形状モデルから取り出される三角平面と定義した立体との誤差を求めた。その結果、半径5mmの球の場合、格子間隔を100 μ mにすると1 μ mの精度が得られることが明らかになった。この結果より、Boundary-Map形状モデルを用いることにより、要求精度より大きな格子間隔でも、精度良く形状が表現できることを確認した。
- (4) Boundary-Map方式を用いることにより、少ないメモリ容量で精度良く形状を表現できることを示したが、さらに、Boundary-Mapデータ構造にデータの圧縮を試みた。

Boundary-Map データ構造におけるデータ圧縮は、同ースキャンラインを示すリストデータを一つにまとめ、ポインタを共有することにより実現できる。この方式を用いることにより、圧縮を行っても形状処理は全く同じアルゴリズムで処理できると共に、可逆性を持つことを確認した。

- (5) Boundary-Map方式のデータにデータ圧縮を適用した結果、圧縮しない場合に比べて1/20～1/40程度に低減できることを確認した。しかし、圧縮率は形状の複雑さや姿勢に大きく影響を受ける。
- (6) データ圧縮を行った際に、メモリ容量を低減できるのはリストデータだけであり、2次元スキャンライン配列は圧縮できない。このため、形状の定義空間を小さくし、容積率を上げることがメモリ低減に有効である。

形状定義に使用したメモリ容量の測定は、開発したプログラムを実行させたときのヒープ領域を測定するプログラムを付加して行った。使用メモリの測定の際にプリミティブ形状を用いて測定を行ったが、プリミティブ形状の定義からBoundary-Mapデータへの変換や、画面への表示に関するアルゴリズムは第4章で詳しく述べる。

また、Boundary-Map形状モデルが高速な工具経路生成や、NC加工シミュレーションなど目的とする高速高精度加工システムに統一して用いることができるかについては、第5、第6、第7章で詳しく述べる。

参考文献

- [76]鳥谷浩志, 千代倉弘明: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版, (1991)
- [77]日経CG編集: CADの基礎知識, 日経BP社
- [78]青山英樹: 99年の3次元CAD/CAMの動向, 型技術, Vol14, No.1(1999), pp. 32
- [79]望月達也: 型作りにおける3次元ソリッドCAD, 型技術, Vol15, No.1(2000), pp. 28
- [80]前川佳徳: ゼロからよくわかる3次元CAD, 機械設計12月臨時増刊号, Vol 4 3, No17(1999), pp. 5
- [81]N. Okino, Y.Kakazu and H.Kubo: TIPS-1 Technical information processing system for computer-aided design, drawing and manufacturing. In J. Hatvany, editor, Computer Language for Numerical Control, p141-150, North-Holland, Amsterdam, (1973)
- [82]I.C.Braid and C.A. Lang: Computer-aided design of mechanical components with volume building bricks. In Proceedings of PROLAMAT '73, (1973)
- [83]B.G. Baumgart : A Polyhedron Representation for Computer Vision. In AFIPS Proceedings, (1975), pp. 589-596
- [84]B.G. Baumgart : Geometric Modelling for Computer Vision. Technical Report, Report STAN-CS-74-463, Stanford University: Stanford Artificial Intelligence Laboratory, (1974)
- [85]服部幸彦: 3次元CAD入門, 日経CG, 4(1994), pp. 177
- [86]竹内芳美 : パーソナル3次元CAD/CAM, 工業調査会, (1996), pp. 25
- [87]A.A.G. Requicha. : Representation for rigid solids Theory, method and systems. ACM Computing Surveys, 12, 4 (1980), pp. 437-464
- [88]J. D. Foley and A. van Dam, S. K. Feiner and J. F. Hughes : Computer Graphics - Principles and Practice -, Addison-wesley publishing company, (1991), pp. 548
- [89]G. Wyvill, T.L. Kunii, and Y. Shirai: Space division for ray tracing in CSG. IEEE Computer Graphics and Applications, 6, 4 (1986), pp. 28-34
- [90]原孝成, 千代倉弘明ほか: 3次元CADを臨床医学に応用する, 日経CG, 5 (1993), pp. 99-105
- [91]S. W. Wang. and A. E. Kaufman : Volume-Sampled 3D Modeling, IEEE Computer Graphics and Applications, Sept, (1994), pp. 26-32
- [92]B.K. Choi and R.B. Jerard: Sculptured surface machining, Kluwer academic publishers, (1998), pp. 255
- [93]高橋百利ほか: 韓国CAMシステムZ-M a s t e r, 型技術, 10, 11(1995), pp. 83-89
- [94]V. Chandru, S. Manohar and C.E. Prakash: Voxel-Based Modeling for Layered Manufacturing, IEEE Computer Graphics and Applications, Nov (1995), pp. 42-47
- [95]鳥谷浩志, 千代倉弘明編著: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版(1991), pp. 16
- [96]小堀研一, 春日久美子: 基礎から学ぶ図形処理, 工業調査会(1998), pp. 86-96
- [97]千田豊満: CADのための3次元形状モデラ入門①-さまざまなモデリング技法-, PIXEL, No. 107, 8月号, 図形処理情報センター(1991), pp. 98
- [98]周藤安造: 医学における三次元画像処理, コロナ社, (1995)
- [99]R. A. Drebin, et al. : Volume Rendering, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4 (1988), pp. 29-37
- [100]A. Kaufman: Volume Visualization, IEEE CS Press, Los Alamitos. Calif., Order No. 2020, (1990)
- [101]S. W. Wang and A. E. Kaufman: Volume-Sampled 3D Modeling, IEEE Computer Graphics and Applications (Visualization), September(1994), pp. 26-32
- [102]S.N. Srihari : Representation of 3-Dimensional Digital Images, Comm. of ACM, 13, 4 Dec. (1981), pp. 399

- [103]K. Yamazaki, H. Suzuki, M. Fujio and Y. Noguchi: Three-dimensional Bit-map geometry processor for CAD/CAM application, Proc. of the 15th NAMRC (SME), (1986), pp.452
- [104]藤本秀雄: コンピュータ統合生産システム, コロナ社, (1993), pp. 147
- [105]岸浪建史, 金井理ほか: Voxel表現の機械加工シミュレータへの応用, 精密工学会誌, 55, 1(1989), pp. 105
- [106]C.L. Jackins and S.L. Tanimoto: Oct-tree and their use in representing three dimensional objects. Computer Graphics and Image Processing, 4(1980), pp. 249-270
- [107]J.R. Rossignac and A.A.G. Requicha: Constant-radius blending in solid modelling. Computers in Mechanical Engineering, 3 (1984), pp.65-73
- [108]V. Chandru, S. Manohar and C. E. Prakash: Voxel-Based Modeling for Layered Manufacturing, IEEE Computer Graphics and Applications (Rapid Prototyping Technology), November(1995), pp. 42-47
- [109]竹内芳美, パーソナル3次元CAD/CAM, 工業調査会, 1996, pp.24
- [110]Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe and R. Orita: Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, Annals of the CIRP, Vol.38/1(1989), pp.429
- [111]Tim Van Hook: Real-Time Shaded NC Milling Display, Computer Graphics, 20, 4(1986), pp. 15
- [112]Minghui Hao, 水垣善夫, 坂本正史: 拡張Z-MapモデルによるCAMシステムの開発, 精密工学会誌, 60, 2(1994), pp. 275
- [113]B.K. Choi and R.B. Jerard: Sculptured Surface Machining, Kluwer academic publishers, (1998), pp.122
- [114]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, 精密工学会誌, 56, 8(1990), pp. 1411
- [115]金井 理, 田中文基, 岸浪建史, 斎藤勝政: セル構造化幾何モデルとそのモデリングシステム, 精密工学会誌, 52, 10(1986), pp. 1808
- [116]M. O. Benouamer and D. Michelucci: Bridging the Gap between CSG and Brep via a Triple Ray Representation, Proc. Fourth Symp. Solid Modeling and Applications, (1997), pp. 68
- [117]天沼光太郎: 金型設計における3次元CADの基本的問題, 型技術, 10, (1995), pp. 27

第 4 章

Boundary-Map 形状モデルに基づく C A D / C A M システムの開発

4. 1 はじめに

近年、コンピュータの高性能化、低価格化と共に、CADシステムの高機能化、低価格化が急激に進み、従来はEWS (Engineering Work Station)上で運用されていたCADシステムは、一台のEWSを複数の設計者が使うのではなく、設計者一人に対し一台のパーソナルコンピュータを用い、複数の設計者とネットワークを介して協調しながら設計作業を行うようになってきている^[118]。

そして、設計過程においては、CADシステムと連携したCAEソフトを用いて熱解析、構造解析、運動解析、応力解析、機構解析などさまざまなシミュレーションを行い、設計の正当性を判断できるようになってきている。さらには、設計を含んだ生産過程における情報において、CAMやPDM, CALS, CPC (Collaborative Product Commerce) ツールが、そして製品のチェックにはCAT (Computer Aided Testing) が用いられ、情報の共有化が図られている^[119]。

現在、製造業全体における情報を取り扱うため、会社全体をシステム化したCIM (Computer Integrated Manufacturing) や国際標準までを視野に入れたIMS (Integrated Manufacturing System) の研究やプロジェクトが行われている^{[120][121]}。

このように、現在のCADシステムは、従来の形状を精度良くコンピュータ内に定義する技術より、使いやすさと、応用技術、システム化に力が注がれている。

一方、近年、消費者の嗜好が多様化、個性化すると共に、商品の嗜好期間が短くなってきている。その一方で、それぞれの製品には高い品質と付加価値及び価格の安いことが同時に求められている。さらには、海外から安価な金型などが流入してくる可能性が出てきたことにより、金型の製作に関して「製品の短納期化」、「製品のコストダウン化」、「製品開発のスピードアップ化」、「製品のダウンサイジング化」、「製品の高性能、高品質化」の要求がさらに厳しくなっている。

このような背景のもとで、「製品の短納期化」、「製品のコストダウン化」など、上述の要求を満たすため、設計から製造までの過程を統一して扱うことにより、設計製造における無駄を省く、高速高精度加工用CAD/CAMシステムの導入が急速に進められている。これは、CAMシステムで作り出すNCデータ (NCプログラム) が、金型加工面精度、金型加工時間、ひいては金型製作期間とコストを決定するためである。

しかし、市販されているCAD/CAMシステムの大半は汎用性を重視し、CAMシステムをCADシステムの応用として位置づけている。すなわち、CADシステムは形状を精度良く簡単に作り上げることを目的とし、加工情報の生成については考慮されていない。NCデータの生成においては、単に工具経路を算出するだけでなく、過切削を防ぐ干渉チェック機能、被削材と機械系との衝突を防ぐ干渉チェック機能、さらには削り残し量の判定機能が不可欠である。しかし、現在のCADシステムで用いられている形状モデルを、CAMシステムやNC加工シミュレーションなどに用いようとした場合には、処理速度、表現精度の点に問題を含んでおり、CAMシステムに適した形状モデルとは言い難い。

特に、近年の高速高精度CNC装置の採用により、大量のNCプログラムが高速高精度

CNC工作機械によって短時間で処理できるようになってきており、工具経路生成に時間を要している現状では、CAMシステムでの工具経路生成時間が高速加工システムのボトルネックとなることが考えられる。CAMシステムがボトルネックになることを防ぐためには、高精度な工具経路を高速に生成できるCAMシステムに適した形状モデルが必要となる。

本研究では、CADシステムで定義された形状から、変換することなくCAMシステムにも利用でき、CAMシステムに適した形状モデルとしてBoundary-Map形状モデルを提案し、第3章でその特徴と有用性を述べた。

本章では、提案するBoundary-Map形状モデルが、CADシステムの持つ必要最小限の機能、すなわち形状の定義と編集が可能であるかを確認するため、Boundary-Map形状モデルに基づいてこれら基本機能を持つCADシステムの開発を行った。

また、Boundary-Map形状モデルを用いて任意の工具経路を高速に生成可能であるかを確認するために、工具経路生成アルゴリズムを開発し、等高線工具経路と走査線工具経路の生成に応用すると共に、工具経路生成に要する処理時間を測定した。さらに、生成した工具経路を用いて、実際にCNC工作機械により加工実験を行いCAMシステムの検証を行うことにより、Boundary-Map形状モデルのCAMシステム用モデルとしての有用性を検証した。

4. 2 CADシステムの構成

コンピュータ内に3次元形状を定義するツールであるCADシステムは、形状モデルの性能に加え、設計者のアイデアを即座に形状モデルに反映させるため、ユーザインターフェイスが重要となりつつある。近年の3次元CADシステムは、形状入力にフィーチャベース・パラメトリック機能を持たせたシステムが増えてきている。また、CADシステムの応用範囲も意匠設計用、機構部品用とアセンブリ用に分類されつつある^[122]。

Boundary-Mapデータ構造を用いたCADシステムにおいても、形状入力のユーザインターフェイスは重要な要素となる。しかし、本研究では汎用のCADシステムやユーザインターフェイスの開発を目的としていないため、必要最小限の形状生成に関する機能開発に限定している。すなわち、本章ではCADシステムとして持つべき基本機能に限定し、提案するBoundary-Mapデータ構造を用いてこれらの基本機能を実現できるかの検証を行った。

開発したCADシステムの構成図を図4.1に示す。システムは、大別して形状入力部、形状生成部、形状編集部、そして形状出力部から構成される。

形状入力部は、汎用CADシステムから入力したデータをBoundary-Map形状モデルに変換する処理を行っている。入力可能なデータのファイル形式は、Boundary-Map形状データの他に、汎用CADシステムで用いられるDXF (Drawing Interchange File) ファイル形式とラピッドプロトタイプ用STL (Stereo Lithography Apparatus) ファイル形式に対応している。形状生成部は、円柱や球のようなプリミティブ形状やNURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 面からなる形状を生成しBoundary-Map形状モデルに変換する。形状編集部はプリミティブ形状間、あるいは汎用CADシステムから入力した形状とプリミティブ形状間のセットオペレーション処理や、形状のスweep処理を行う。形状出力部は、Boundary-Map形状モデルから微小ポリゴンを求め画面への形状の描画を行うと共に、これらの微小ポリゴンをDXF (3DFACE) やSTL形式のファイルに変換し、ファイル

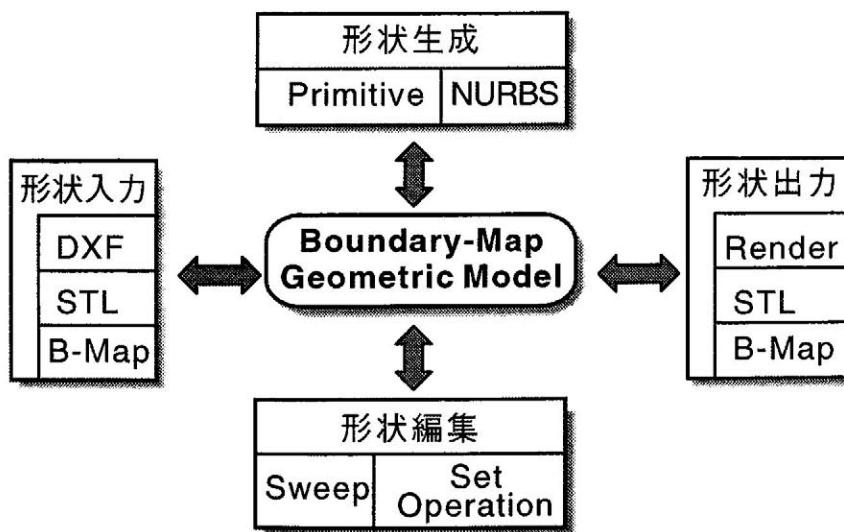


図4.1 CADシステム構成図

出力を行っている。また、Boundary-Map 形状データでの保存も可能である。

現在の形状入力部は、汎用CADシステムからデータ入力を想定しているが、Boundary-Map データ構造はVoxel データ構造を包含しているため、CT (Computed Tomography) やMRI (Magnetic Resonance Imaging) などから得られる積層画像データから3次元形状を入力することが可能となると考えられる。これらの画像データから得られた立体は、内部の非可視形状の再現、外科手術のシミュレーションや、欠損した骨の加工など医療に利用できるだけでなく、現在多用されてきているリバースエンジニアリングからのダイレクトな形状入力も可能となると考えられる^{[98][123]}。

4. 3 プリミティブ形状の生成

4. 3. 1 プリミティブ形状の定義

コンピュータ上で3次元形状を定義する手法として、円柱や球などの数式表現可能な基本的な形状を定義し、これらの形状に対して、論理和や論理差、論理積などの形状編集操作を組み合わせ、3次元形状を構成する手法が多用されている。この手法は、生成できる形状に制限を持つが、形状生成過程をデータとして持つと共に、直感的でわかりやすい特徴を持つ。形状を定義する際に基本となる円柱や球などを基本形状（プリミティブ形状）という。

開発したBoundary-Map形状モデルに基づくCADシステムにおいても、このプリミティブ形状の生成と編集による形状定義手法を用いた。開発したBoundary-Map形状モデルに基づくCADシステムで定義できる基本形状は図4.2に示す5個の形状である。それぞれのプリミティブ形状は、各プリミティブ独自の座標系であるオブジェクト座標系を持ち、オブジェクト座標系原点を基準に半径や高さなどを定義する。

円柱（楕円柱）の場合には円柱の x 、 y 軸方向の半径 R_x 、 R_y と高さ H を与えて円柱を定義する。直方体の場合には、直方体の一端を原点とし、 x 、 y 、 z 各軸方向の長さ W_x 、 W_y 、 W_z を与えることにより直方体を定義する。球（楕円体）の場合には、球の中心を原点とし、 x 、 y 、 z 各軸方向の半径 R_x 、 R_y 、 R_z を与えて形状を定義する。また、 z 方向にCutHのパラメータを定義することにより、球をCutHの高さで切断した形状も定

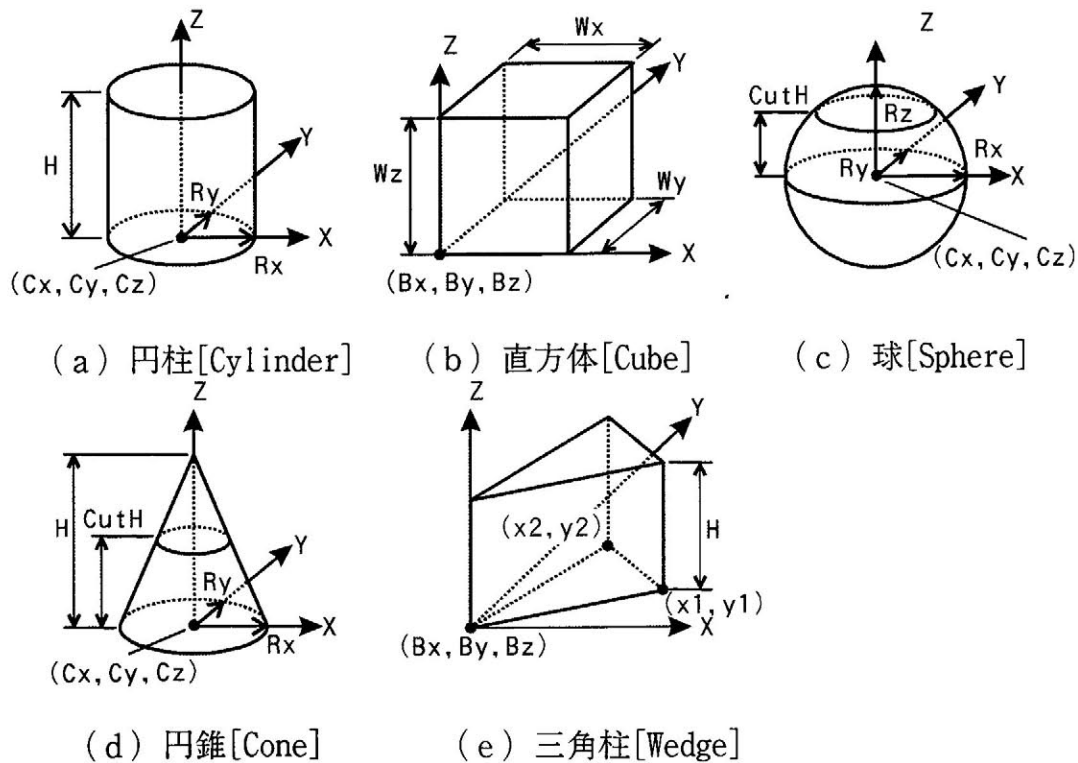


図4.2 プリミティブ形状

義可能である。円錐（楕円錐）の場合は、底面の中心を原点とし、 x 、 y 軸方向の半径 R_x 、 R_y と z 軸方向の高さ H により形状を定義する。また、球と同様に z 方向の切断高さ $CutH$ を与えることにより円錐台を定義することができる。三角柱の場合には、三角柱の底面の 1 点を原点とし、底面の他の 2 点 (x_1, y_1) と (x_2, y_2) 、そして z 軸方向の高さ H を与えることにより定義している。

プリミティブ形状を実際に形状を配置する空間（ワールド座標）に定義するには、各プリミティブの半径や高さなどの幾何情報の他に、各形状のオブジェクト座標原点が最終的な定義空間のどの位置にあるかを示す必要がある。

4. 3. 2 オブジェクト座標とワールド座標

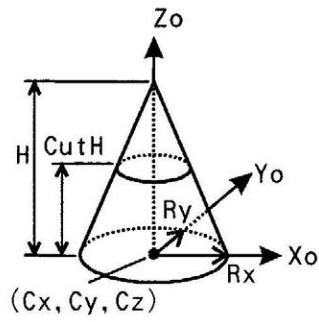
CADシステムやCGにおいて形状を定義する際、オブジェクト独自の座標と各オブジェクトを最終的に定義するワールド座標を一般に用いる。これらの座標系では右手座標系を用いている^[124]。定義される形状において、オブジェクト座標は単一プリミティブ、あるいは複合された形状毎に複数定義することができる。また、オブジェクト座標はネストが可能であり、オブジェクト座標に定義された形状を、さらに他のオブジェクト座標にまとめ、定義形状全体をツリー構造で保持することができるため、形状定義終了後の形状編集に便利である。

しかし、最終的なワールド座標は唯一の座標であり、加工やシミュレーションなどは、実空間座標に対応したワールド座標に基づいて実行される。プリミティブ形状をワールド座標に定義するには、オブジェクト座標原点をワールド座標上のどの位置に配置するかを示す座標値を与えると共に、 x 、 y 、 z 各軸毎の回転 α 、 β 、 γ を与えてワールド座標上に定義する。これらの回転パラメータによりプリミティブ形状は任意の姿勢をとることができる。ここで回転方向は、座標軸先端から原点方向をみて、左回転を正とする。

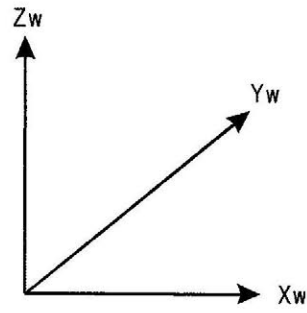
例えば図 4. 3 (a) に示す円錐のオブジェクトを図 4. 3 (b) に示すワールド座標に定義する場合を考える。形状定義は、図 4. 3 (c) に示すように、円錐のオブジェクト座標原点をワールド座標上の点 (C_x, C_y, C_z) に対応付け、各軸方向に回転パラメータ α 、 β 、 γ を与えることにより、図 4. 3 (d) に示すように円錐を傾けてワールド座標上に定義できる。

ワールド座標上でのオブジェクト座標原点の位置 (C_x, C_y, C_z) と、オブジェクト座標の各軸のワールド座標上での回転角 (α, β, γ) が与えられたとき、オブジェクト座標上の任意点 $X_o(x_o, y_o, z_o)$ は、コンピュータグラフィックスの座標変換に従って、以下の手順によりワールド座標上の $X_w(x_w, y_w, z_w)$ 点に変換する。

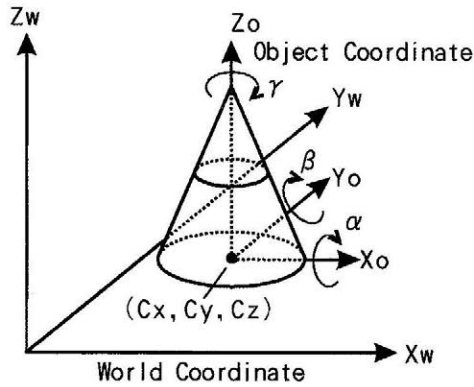
- ① (4-1) 式を用いてオブジェクト座標の原点をワールド座標の原点に移動する。
- ② (4-2) 式を用いてオブジェクト座標の X 軸を α 度回転させる。
- ③ (4-3) 式を用いてオブジェクト座標の Y 軸を β 度回転させる。
- ④ (4-4) 式を用いてオブジェクト座標の Z 軸を γ 度回転させる。
- ⑤ (4-5) 式を用いてオブジェクト座標の原点をワールド座標の (C_x, C_y, C_z) に移動する。



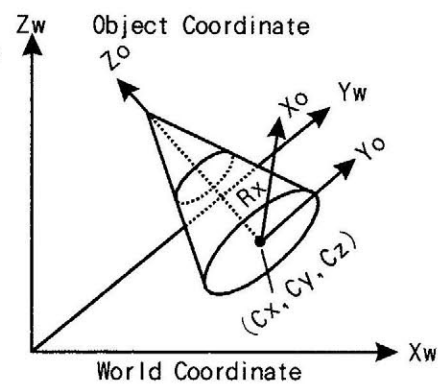
(a) オブジェクト座標



(b) ワールド座標



(c) オブジェクト座標の配置



(d) ワールド座標への変換

図4.3 オブジェクト座標とワールド座標

これらの手順は、同時座標系を用いて4行4列の行列として扱うことができる。それぞれ

$$\begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -Cx \\ 0 & 1 & 0 & -Cy \\ 0 & 0 & 1 & -Cz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x0 \\ y0 \\ z0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$\begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$\begin{bmatrix} x3 \\ y3 \\ z3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

となる。これらの手順を示す変換式をまとめると

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

で表すことができる。

この式から、行列式のみを計算して合成行列 T とすると

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

となり，変換式（4-6）を合成行列 T を用いて表すと

$$X_w = T X_o \quad (4-8)$$

となる．逆に，ワールド座標上の点 X_w はオブジェクト座標上では，合成行列の逆行列を用いて次式で表される．

$$X_o = T^{-1} X_w \quad (4-9)$$

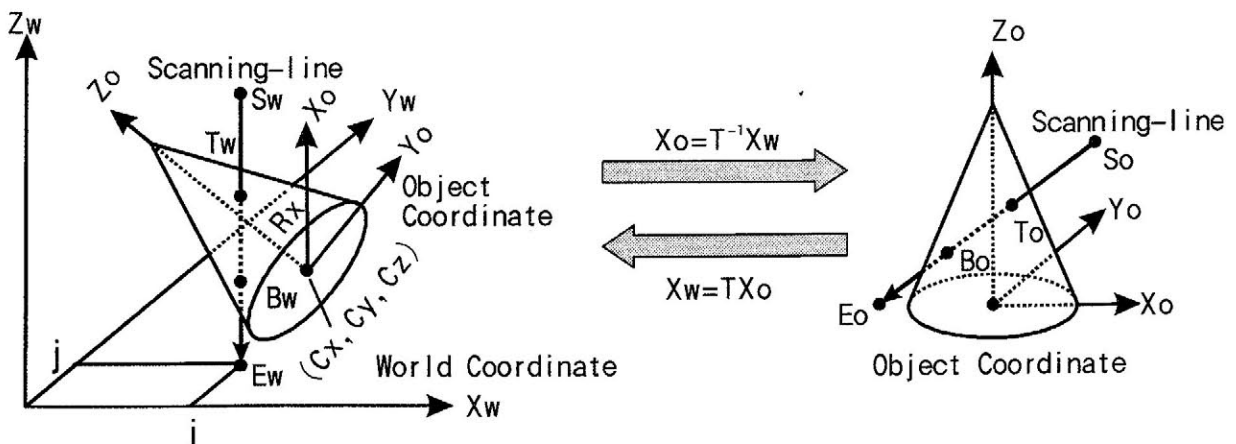
（4-8）式と（4-9）式を用いることで，オブジェクト座標とワールド座標の座標変換を簡単に行うことが可能となる．

4. 3. 3 プリミティブ形状の Boundary-Map 形状モデル変換

ワールド座標に定義されたプリミティブ形状をBoundary-Map形状モデル化するには，オブジェクト座標上で定義された幾何形状と，ワールド座標上への変換行列に基づいて，ワールド座標上にあるスキャンラインとオブジェクト座標上の形状の交点を算出する必要がある．交点計算の基準をオブジェクト座標にとるかワールド座標にとるかについて計算手法に大差は生じないが，計算式が簡単となるようにワールド座標上のスキャンラインをオブジェクト座標に座標変換し，交点計算を行った．

座標変換に必要なパラメータは，プリミティブ形状が定義されているオブジェクト座標原点のワールド座標上での座標値 (C_x, C_y, C_z) と，オブジェクト座標の角軸の回転角 α, β, γ であり，それぞれの演算には合成行列を用いて（4-8）式，（4-9）式により計算を行う．

例として，図4.4（a）に示すような円錐をワールド座標上に定義した場合，XY平面における任意のスキャンライン $S_w - E_w$ との交点は T_w, B_w となる．この値を求めるためには，図4.4（b）に示すようにスキャンラインをオブジェクト座標系での直線 $S_o - E_o$ に（4-9）式を用いて座標変換し，オブジェクト座標上において円錐との交



(a) ワールド座標

(b) オブジェクト座標

図4.4 スキャンラインとプリミティブ形状との交点計算

点 T_o , B_o を求める。そして、求めた交点を (4-8) 式を用いてワールド座標に座標変換し、交点 T_w , B_w を求める。

プリミティブ形状を Boundary-Map 形状モデルに変換するには、 XY , YZ , ZX 平面におけるすべてのスキャンラインについて交点計算を行い、求めた交点をリスト構造として格納する必要がある。

オブジェクト座標におけるスキャンラインとプリミティブ形状の交点計算は、前述の座標変換により単純な任意直線と2次曲面との交点計算の問題として解くことができる。2次曲面は一般に (4-10) 式で表される。

$${}^t x Q x = 0 \quad (4-10)$$

ここで、

$${}^t x = [x \ y \ z \ 1]$$

$$Q = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ B & E & F & G \\ C & F & H & I \\ D & G & I & J \end{bmatrix}$$

であり、 Q は2次曲面毎に異なる値を持つ。一方、 R_o 点を通り、単位方向ベクトル R_d を持つ直線 $R(t)$ は次式で表される^[125]。

$$R(t) = R_o + t R_d \quad (4-11)$$

これらの2次曲面と直線との交点を求めるには (4-10) 式と (4-11) 式の連立方程式を解く必要がある。(4-11) 式を (4-10) 式に代入してまとめると

$$A_q t^2 + 2B_q t + C_q = 0 \quad (4-12)$$

が得られる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} A_q &= x_d(Ax_d + 2By_d + 2Cz_d) + y_d(2Fz_d + Ey_d) + Hz_d^2 \\ B_q &= x_d(Ax_o + By_o + Cz_o + D) + y_d(Bx_o + Ey_o + Fz_o + G) + z_d(Cx_o + Fy_o + Hz_o + I) \\ C_q &= x_o(Ax_o + 2(By_o + Cz_o + D)) + y_o(Ey_o + 2(Fz_o + G)) + z_o(Hz_o + 2I) + J \end{aligned} \right\} \quad (4-13)$$

である。この式から、 R_o から交点までの距離 t を求めることにより2交点を求めることができる。

具体的な例として、図4.4(b)に示した円錐の場合を考える。オブジェクト座標に変換されたスキャンラインを示す直線R(t)は

$$R(t) = S_o + t R_d \quad (4-14)$$

であらわされる。ここで、 $S_o(x_o, y_o, z_o)$ はオブジェクト座標上でのスキャンラインの始点であり、 $R_d(x_d, y_d, z_d)$ はオブジェクト座標上での直線の単位法線ベクトルである。

一方、定義された円錐は頂点を原点とした場合

$$\frac{x^2}{R_x^2} + \frac{y^2}{R_y^2} - \frac{z^2}{H^2} = 0 \quad (4-15)$$

で表される。ここで、円錐を表す行列Qは

$$Q = \begin{bmatrix} R_y^2 H^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_x^2 H^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_x^2 R_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

で表される。(4-16)式を(4-13)式に代入すると、 A_q, B_q, C_q は以下の式となる。

$$\begin{aligned} A_q &= R_y^2 H^2 x_d^2 + R_x^2 H^2 y_d^2 - R_x^2 R_y^2 z_d^2 \\ B_q &= R_y^2 H^2 x_o x_d + R_x^2 H^2 y_o y_d - R_x^2 R_y^2 z_o z_d \\ C_q &= R_y^2 H^2 x_o^2 + R_x^2 H^2 y_o^2 - R_x^2 R_y^2 z_o^2 \end{aligned} \quad (4-17)$$

故に、交点までの距離tは、(4-12)式の解法より

$$t_{1,2} = \frac{-(2B_q) \pm \sqrt{(2B_q)^2 - 4A_q C_q}}{2A_q} \quad (4-18)$$

で求めることが可能となる^[126]。

そして、交点座標は求めた t_1, t_2 を用いて(4-14)式に代入してオブジェクト座標における交点 T_o, B_o を求める。さらに、この交点を(4-8)式を用いて座標変換することにより、ワールド座標での交点 T_w, B_w を求めることができる。この値をワールド座標でのスキャンラインに対応する交点としてリストデータに格納することによりBoundary-Map形状データが生成される。

交点が無い場合や、定義された高さの範囲内に見つからない場合には、円錐の底面と交差する可能性があるため、まず円錐の底面を含む平面との交点を求め、交点が存在する場合には、交点が円の内部に存在するか判定し、存在する場合は交点とする。この手法は、プリミティブが異なっても同様に解くことができる。

図4.5に生成したプリミティブ形状の例を示す。生成したプリミティブ形状は楕円

体, 楕円錐, 円錐台, 直方体である. 色などの情報はデータリストの属性 I D の設定値により変更することができる.

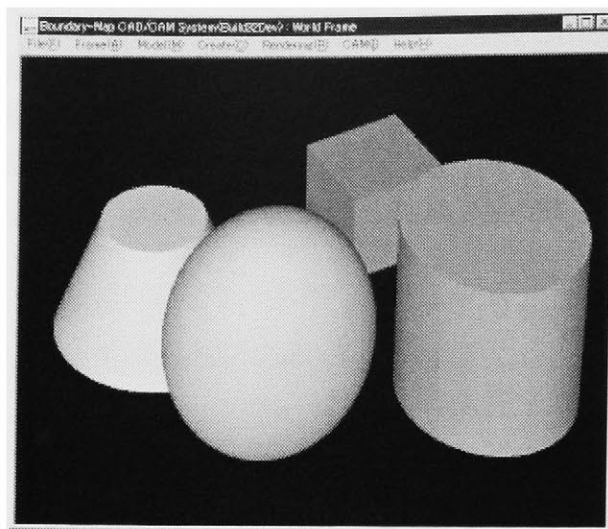


図 4. 5 プリミティブ形状の生成例

4. 4. NURBS形状の生成

4. 4. 1 NURBS曲面の定義

消費者ニーズの多様化, デザイン重視の傾向を受けて, さまざまな製品に自由曲面が利用されるようになってきている. 自由曲面をCADシステムで取り扱うには曲面を数式で表現する必要がある, これまでに様々な曲面式が研究されてきている^[127]. 近年は計算機の性能向上にあわせてB-Splineを有理化したNURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面が主流となりつつある. NURBS曲面が使われる理由は, 機械加工分野で多く利用される2次曲面を従来のベジェ曲面やB-Spline曲面では正確に表すことができなかったが, NURBS曲面では多項式曲面の制御点に重みを持たせる(有理化:Rational)ことにより2次曲面を正確に表現できるためである^[128]. また, NURBS曲面は, つなぎ目に対応するパラメータの間隔が均等でなくても良い(Non-Uniform)ため, 曲面形状を微妙に制御できる利点を持つ. しかし, 一般に曲面式は面であるため, 現在主流となりつつある3次元のソリッドモデルシステムとデータ構造や形状処理方式が異なることにより, 現状のCADシステムにおいても曲面の取り扱いに優れた意匠設計用CADシステムとソリッド設計を重視した組み立て, 加工用CADシステムに分離している^[122].

Boundary-Mapデータ構造では, 形状データはすべて離散化されるため, 曲面やプリミティブといった情報は形状データとして基本的には保持しない. このことは, 自由曲面であってもプリミティブ形状でもあっても, 一度Boundary-Map形状モデル化を行うと後の処理は同一に取り扱うことが可能となる特徴を持つ.

一般に, NURBS曲面は図4. 6に示すような点列座標と各点に割り当てられた重みによって表現される. 重みの値が大きくなるほど曲面が重みに対応する制御点の方に引っ張られる事を意味する. $(n+1) \times (m+1)$ 個の制御点から生成されるNURBS曲面を有理式で表現すると式(4-19)式となる. ここで, P は制御点, w はその制御点での重み, T はノットベクトル, k, l は曲線の階数を示しており, $S(u, v)$ は $k \times l$ 次のNURBS曲面を

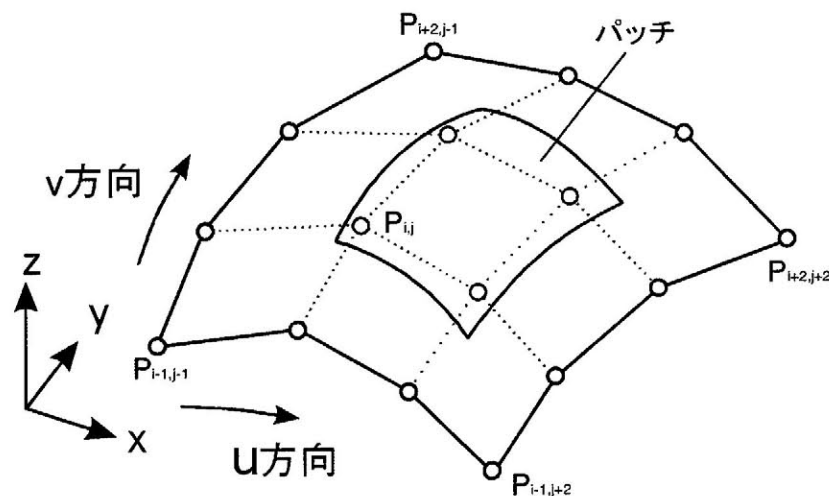


図4. 6 NURBS曲面

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij}} \quad (4-19)$$

表している。ここで、 $N_{i,k}(u)$ 、 $M_{j,l}(v)$ は、次式で表される u 、 v パラメータ方向の基底関数である。

$$N_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k-1}-t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k}-t}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t)$$

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & (t_i \leq t \leq t_{i+1}) \\ 0 & (t < t_{i+1}, t_{i+1} < t) \end{cases}$$

$$T = [t_0, t_0, t_0, \dots, t_{n+k-1}]$$

開発したBoundary-Map形状モデルに基づくCADシステムで使用するNURBS曲面は6階のNURBS曲面である。これは5次のNURBS曲面であれば反射光の連続性を保証する2次微係数まで自由に操作でき、CADシステムとして使用する上では十分な表現力があると判断したためである。

4.4.2 NURBS曲面のBoundary-Map形状モデル変換

Boundary-Map形状データの生成は、スキャンラインという直線と定義形状との交点座標を算出することにより実行されるため、NURBS曲面をBoundary-Map形状モデルに変換するにはNURBS曲面と直線の交点の算出が必要となる。しかし、NURBS曲面と直線の交点演算は曲面式がパラメトリック形式で定義されているため、スキャンライン上に存在する点を探すには必要以上に細かく曲面上の点を算出しなければならず、処理に多くの時間を要する。そこで本研究では上記の手法に比べて精度は落ちると考えられるが、格子間隔との関係により得られる曲面上の点を抽出し、この点群から新たに面を生成し、面とスキャンラインとの交点座標を求めることにより、形状を生成する手法を用いた。

具体的には、図4.7(a)に示すように、制御点と重みより表現されたNURBS曲面に対し、設定された間隔を持つ点群を求め、求めた点群から点列を結んで図4.7(b)に示す三角メッシュに変換する。そして、三角メッシュの中から、図4.7(c)に示すように、求めたいスキャンラインと交差する点列を求める。最後に、交点をソートし、上から二つずつの交点をリストデータとして格納することにより、NURBS曲面をBoundary-Map形状モデル化している。

開発したアルゴリズムを用いて、点群をNURBS曲面で補間し、Boundary-Map形状モデル化した形状の表示例を図4.8に示す。図4.8(a)の凸形状は7×7の制御点、図4.8(b)の凹形状は5×5の制御点から生成されている。

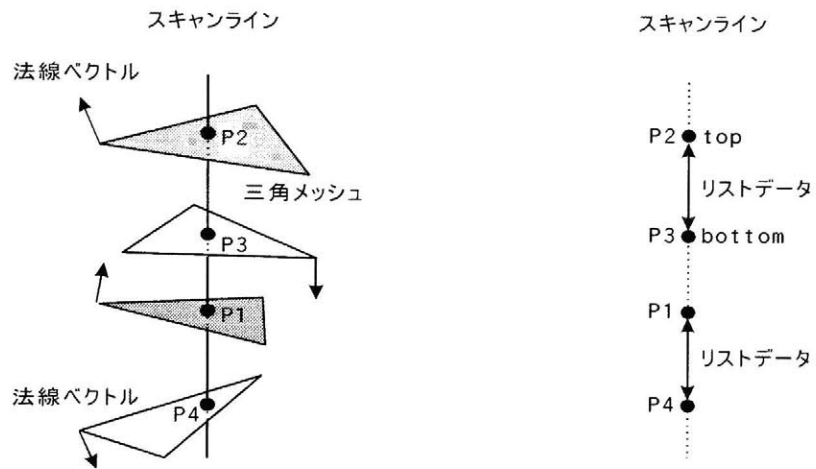
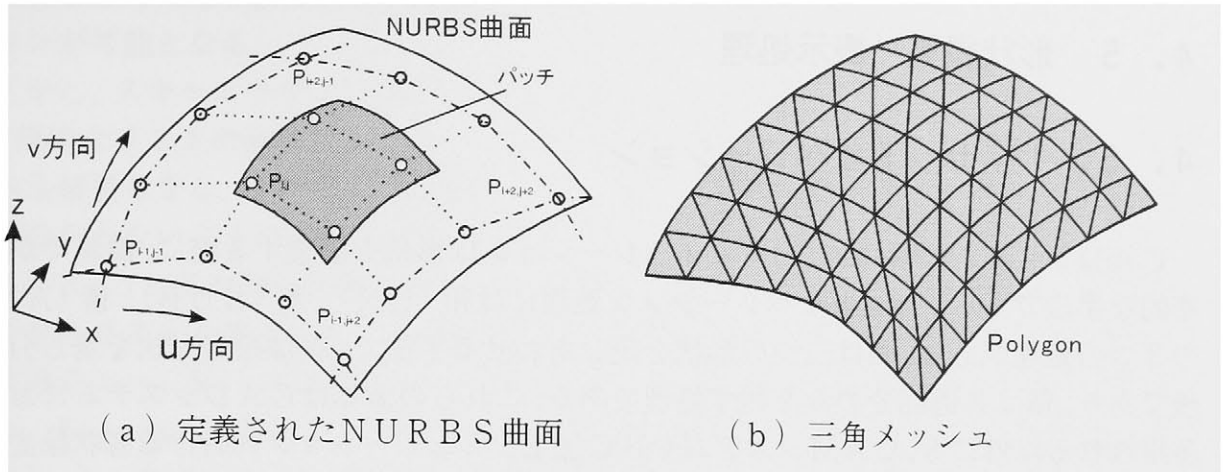


図4.7 NURBS曲面の表現例

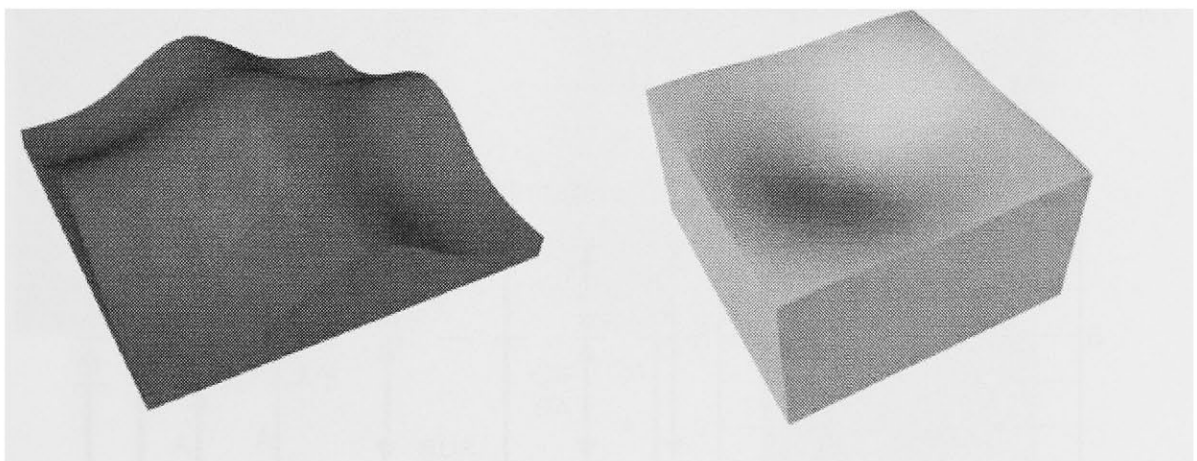


図4.8 NURBS曲面の表現例

4.5 形状編集・表示処理

4.5.1 セットオペレーション

CADシステムにおいて、セットオペレーションは形状を構築する際に、簡単でかつ効率的な手法である。セットオペレーション処理には和 (OR)、差 (SUB)、積 (AND) の3つの処理がある。和は二つの形状を足しあわせる手法で、差は指定形状を差し引く処理であり、積は共通部分のみを残す処理である。これらの演算はCADシステムにおいて多用される以外にも、CAMシステムやNC加工シミュレーションにおける形状除去処理においても利用されるため、CAD/CAMシステムにおいて多用されている。ところが、曲面形状間の処理においては計算が複雑になり、形状モデルの位相データと幾何データにおいて処理の整合性がとれなくなるケースが発生するなどの問題が生じている。しかし、Boundary-Map形状モデルのように、形状データを一度離散化すれば、処理が単純になるため処理速度の向上が望めると共に、位相データと幾何データの整合性の問題もなくなる。

Boundary-Map形状モデルにおいてセットオペレーションを実行するためには、同一の格子構造を持つ形状間の対応する形状リストごとに処理を行う必要がある。図4.9に示す直方体ワークAとボールエンドミルBについてセットオペレーションを行う場合を例に、説明する。セットオペレーションを行うに当たり、XZ平面におけるスキャンラインL₁ (図4.9 (b) (1)) の場合には、スキャンラインL₁上の形状リスト、AとBについて (b) (2) に示すように形状リストをAのみ、AB共有、Bのみの3つの形状リストに分ける。そして、この形状リストのうちA、AB、BのすべてをまとめるとOR (b) (3) に、Aの部分のみを残すとSUB (b) (4) に、AB部のみを残すとAND (b) (5) となる。この処理を、XY、YZ、ZX平面のすべての格子におけるスキャンラインについて実行することにより形状のセットオペレーションが可能となる。このように、NURBS形状であっても、

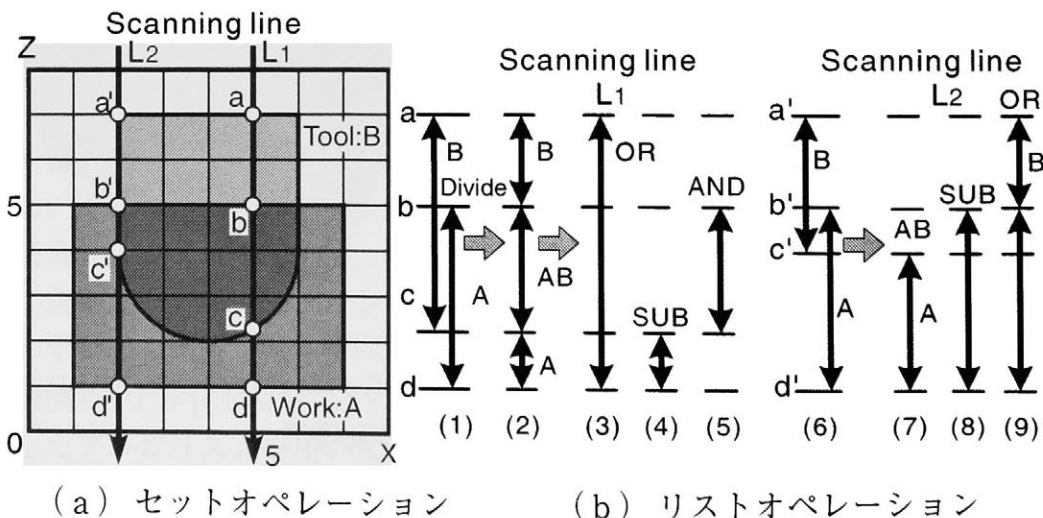


図4.9 セットオペレーション処理

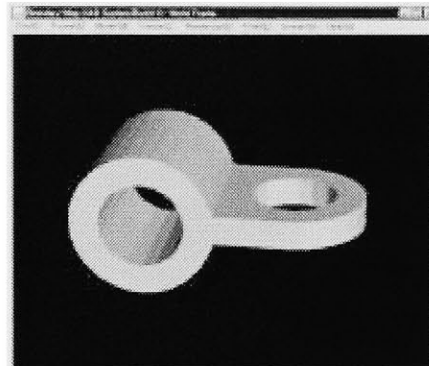
一度Boundary-Map形状モデルに変換することにより、統一した手法によりセットオペレーションが可能となる。

しかし、スキャンライン L_2 のような工具端におけるスキャンラインのSUB処理の場合、単純なリストの演算では、(b)(7)に示すように b' 点が存在するにもかかわらず除去される結果となる。そこで、工具端のリストにおいては、AB共有リストについてSUB処理を行わないようにしている((b)(8))。また、ORについては、共有リストの両端 b' 、 c' のX、Y、Z方向の状態を調べ、 c' のように形状の中に存在する点であれば、その点を含むリストを結合している((b)(9))。このように、セットオペレーションにおいて、形状端やエッジ部におけるリストに対しX、Y、Z方向の整合性をとる処理を行うことにより、Boundary-Mapデータ構造に似た構造を持つが、3方向の正当性を考慮しないTriple-Ray法^[116]に比べて精度良く形状を表現できる。

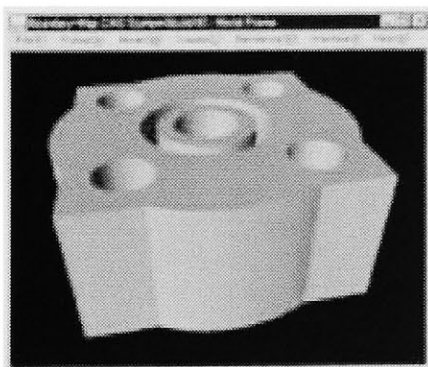
図4. 10 (a)は6個の円柱、(b)は円柱4個と直方体、(c)は円柱8個と直方体、そして(d)はNURBS曲面と直方体と円柱のセットオペレーションにより定義された形状の表示例である。



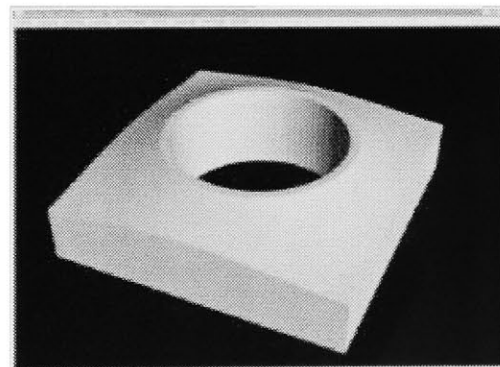
(a) 円柱 5 個



(b) 円柱 4 個と直方体



(c) 円柱 8 個と直方体

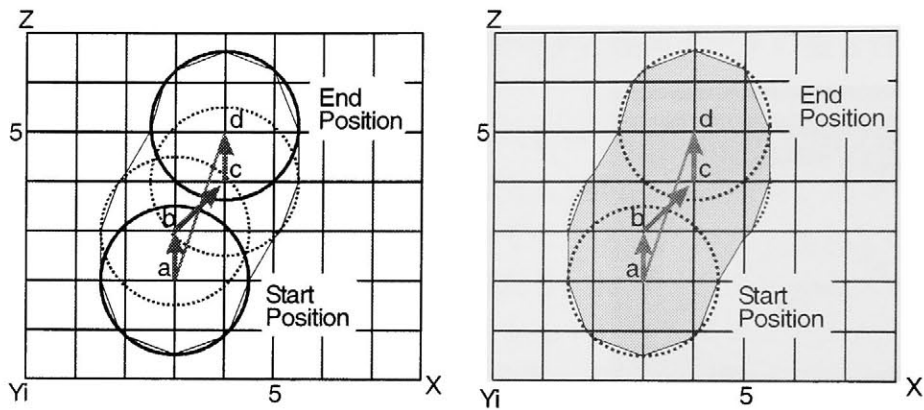


(d) NURBS 曲面, 円柱と直方体

図4. 10 セットオペレーション例

4. 5. 2 スイープオペレーション

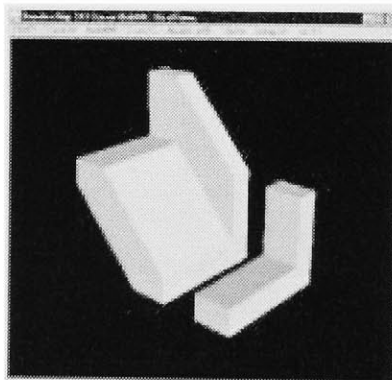
スイープ処理もまた, CADシステムの機能として形状定義の有効な手法である. Boundary-Map形状モデルによるスイープ処理は, スイープ軌跡を離散化し, 各位置におけるスイープ形状の論理和の実行結果がスイープ後の形状となる. 簡単のために図4. 11に示すような2次元で円(スイープ対象形状)をスイープ開始位置 a から終了位置 d までスイープさせる場合を例に説明する. 同図のように a 点から d 点までのスイープ軌跡を算出し, スイープ軌跡上の各点においてスイープ形状のセットオペレーションOR処理を繰り返すことにより, スイープ形状を生成する. 図4. 11の場合, スイープ軌跡は離散化され a, b, c, d となるので, の4個の円の軌跡における形状についてOR処理をした形状がスイープ後の形状となる.



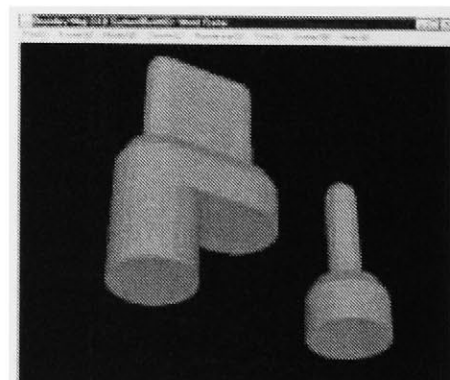
(a) スイープ軌跡

(b) スイープ形状

図4. 11 スイープ処理



(a) L形状のスイープ例



(b) 工具のスイープ例

図4. 12 スイープ処理生成形状例

Boundary-Map形状モデルでは2次元形状も3次元形状も同じアルゴリズムでスイープ処理が可能である。図4.12(a)はL型の形状を斜め方向にスイープした例であり、図4.12(b)は工具を縦横に3次元スイープ移動した例である。工具のスイープは、見やすくするため上下を反転して表示している。

4.5.3 レンダリングオペレーション

Boundary-Map形状モデルを用いた形状を描画する場合、ポリゴンを生成して描画する手法とメモリ内のVoxelデータを直接画面に描画するボリュームレンダリングが適応できる。本研究では描画の高速化とSTLファイル出力を考慮してポリゴンを生成する手法を適応する。具体的にはBoundary-Map形状モデルを構成する格子からVoxelを取りだし、Voxelの中から面を取り出す手法を用いる。

例えば図4.13に示す円柱を描画する場合、空間から格子間隔に基づくVoxelを取り出し、Voxelの中から表面の面だけを取り出す。図のように、円柱上端部の端の部分におけるVoxelからは、側面3面(A, D, E)と上下2面(B, C)の計5面のポリゴンが取り出される。しかし、下面Cと側面D, Eの面は形状の中にあるので、描画対象とする面から除外する。残る形状表面であるA, B面について3角形に分割する。そして、取り出された三角面はOpenGLライブラリ^{[129][130]}を用いて順次描画していく。この処理をすべての定義空間を構成するVoxelについて行うことにより、Boundary-Map形状モデルで定義された形状の描画を行う。

本論文中に用いた形状の表示はすべてこの手法により描画したものである。

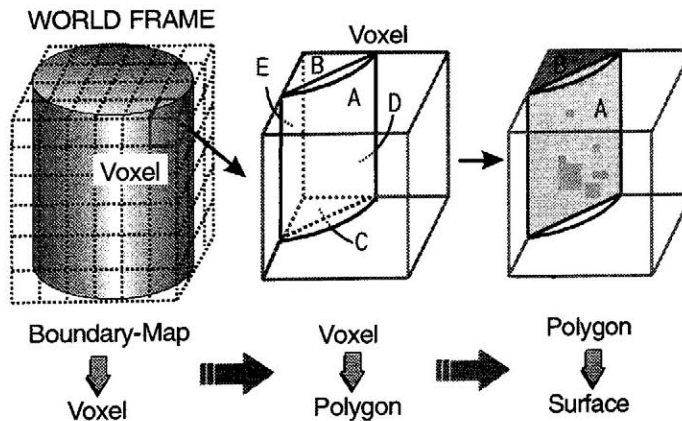


図4.13 ポリゴンの取り出し

4. 6 工具経路生成の概念

4. 6. 1 工具フレームとワークフレーム

CAMシステムにおいて、形状モデルを用いて工具の移動軌跡を求める手法は、オフセット法と非オフセット法に大別できる^{[131][132]}。オフセット法とは、加工対象形状表面を工具の中心が通る位置だけオフセットする手法であり、オフセット面の計算が主流となる。一度オフセット面を生成してしまえば工具形状が変わらない限り、ピックやピッチは任意に設定でき、オフセット面生成時間を除いた工具経路生成のみに要する時間は高速となる。しかし、工具形状が異なるたびに工具オフセット面を生成する必要があることや、曲面式を用いてオフセット面を求めるために複雑な処理が必要となり処理時間を要したり、複雑な面の組み合わせによってはオフセット面が求められない事態も発生する。これらの問題を解決するため、形状データを離散化して用い、オフセット形状を求める逆オフセット法^[133]なども提案されているが、精度が低下するなどの問題を含んでいる。これらのことから、近年のCAMシステムでは非オフセット法を利用したシステムが増えつつある。

非オフセット法の代表的な手法には、工具を対象形状に接触させながら動かし、動いた軌跡を工具経路とする接触法がある。この他にも、形状の断面を利用した干渉線投影法^[134]や、倣いの仮想スタイラスを工具表面に当てて生成するなど様々な手法が提案されている^[135]。接触法は加工中の加工条件の変更などに迅速に対応できるため現在のCAMシステムで多く利用されている。接触法を実現する手法として、対象曲面を表す曲面式を利用して幾何的に接触点を求める手法^[136]と、曲面を分割し細かいポリゴンの集合体であるポリゴンメッシュに分割してから工具との接触点を求める手法^[137]に大別できる。前者は正確な接触点を求めることができる反面、処理が複雑なため処理時間を要する問題があり、後者は分割による精度低下の問題が生じる。しかし、加工中における素材や機械系との干渉チェックが困難であるため、生成後の工具経路にはNC加工シミュレータによる干渉チェックが必要となる。

Boundary-Map形状モデルを用いて工具経路を生成させる場合、Boundary-Map形状モデルによるデータ構造は高速に断面形状を抽出できるため、逆オフセット法を利用することもできるが、本研究では高速な干渉チェックを実現できるBoundary-Map形状モデルのデータ構造の特長をいかして、図4.14に示すように加工対象形状と工具を別々の空間に定義し、工具を加工対象形状表面に沿って接触するように移動させた時の軌跡を求め、工具経路とする手法を考案した。

加工対象形状とジグ等の加工中移動しない形状を含む空間をワークフレームと呼び、工具形状と移動する形状を含む空間を工具フレームと呼ぶ。ただし、両フレームにおける格子間隔は同一である必要がある。提案する方式によれば、工具を含む実際の加工状態における治具等との干渉も考慮した工具経路の生成を行なうことができる。また、この手法では工具の形状に制限が無く、加工途中で工具に微少な変形等が発生した場合でも、工具の形状のみを変更させることにより対応できる。

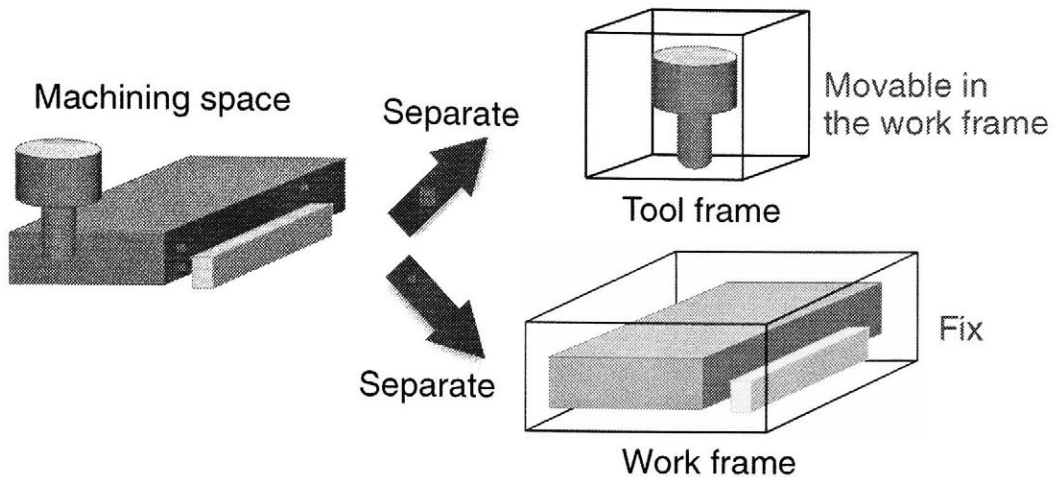
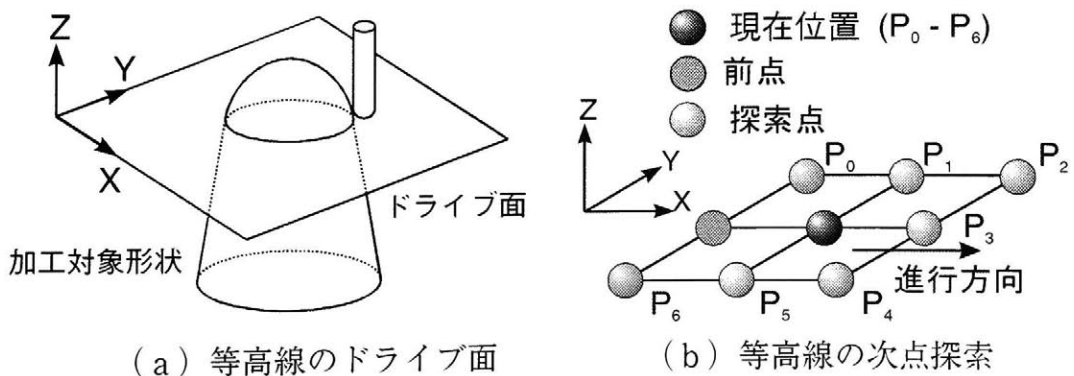


図 4. 1 4 ワークフレームと工具フレーム

4. 6. 2 工具経路生成の概念

Boundary-Map形状モデルを用いた工具経路の生成においては、工具フレームに定義した工具と、ワークフレームに定義した加工対象形状を常に接するように工具を移動させる必要がある。本研究では、工具経路生成の対象として現在主流である等高線工具経路と走査線工具経路を対象として工具経路の生成を行った。等高線工具経路や走査線工具経路では移動する平面は一般にXY、YZそしてZX平面であり、これらの面内で工具中心は移動する。この面をドライブ面として工具を加工対象に接するように移動させ、工具経路を生成する。

図 4. 1 5 (a) に示すように、等高線加工ではXY平面における高さZにおける平面がドライブ面となる。そして同図 (b) に示すように、工具の移動先である次点は工具の現在位置から周囲8カ所の格子上の位置の内、前回の位置を除く7カ所にあるとする。そこで、工具をこれら7カ所に移動した際の工具と形状の干渉状態をチェックする。干渉状態には、工具と加工対象形状が接している状態（接触）、干渉している状態（干渉）、接触



(a) 等高線のドライブ面

(b) 等高線の次点探索

図 4. 1 5 工具経路生成の概念図

も干渉もしていない状態（非干渉）の3状態に分けることができる。干渉の場合には、干渉量から判断して、近傍に接する位置が見つかったら、格子上に無い点であっても接触状態と判断する。工具経路は常に工具と加工対象形状が接している必要があるため、周囲7個の点から接触点を見つけ、次点の工具中心位置とする。

図4.16は、等高線における工具経路生成手法をフローチャートで表した図である。等高線の場合、スタート点と終了点は同じであるので、工具の現在点がスタート点に戻った際に終了とする。そして、次点探索においては周囲7カ所の干渉状態をチェックし、接触点が見つかった場合には接触点を次点とする。干渉があった場合は、7カ所の干渉状態からさらに接触する点を求めて次点とする。通常あり得ないが、周囲7カ所すべてが非干渉となった場合はエラーを表示する。このように逐次、次点探索を行い、次点が終了点に到達するまで次点探索を繰り返すことで工具経路を生成する。

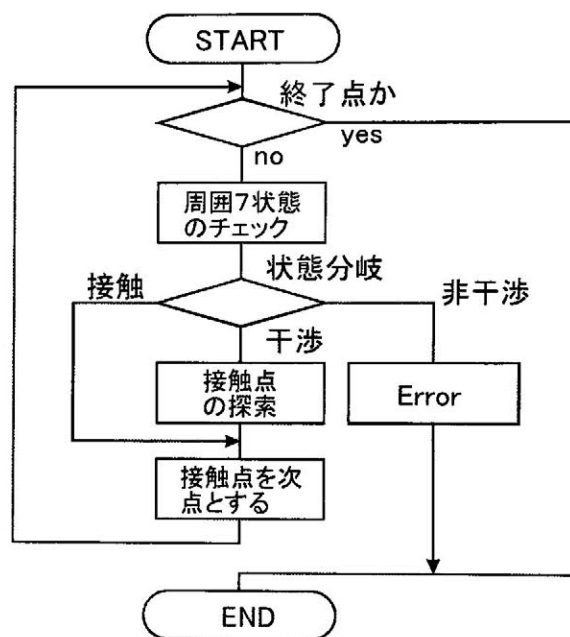


図4.16 等高線工具経路生成の手順

4. 7 接触位置の探索

4. 7. 1 干渉チェック

Boundary-Map形状モデルで工具と加工対象形状の接触点を求めるためには、工具と加工対象形状の接触状態を把握する必要がある。工具と加工対象形状の状態は非干渉、接触、干渉のいずれかである。これらの判定を行うためには工具と加工対象形状間において干渉チェックを行う機能を開発する必要がある。この干渉チェック機能は、加工時の接触点探索だけでなく、NC加工シミュレーションにおける工具とワークや機械部との干渉チェックにも応用することができる。

NC加工シミュレーションや工具経路を高速に求めるためには、加工対象物と工具の干渉チェックを高速に行わなければならない。空間格子法はこの干渉チェックに数値演算が不要であるため、容易にしかも高速に処理できる特徴を持っている。

Boundary-Map形状モデルにおける干渉チェックには、チェックを行う二つの形状を含むワークフレームと工具フレームを用意する。2次元でのワークと工具の干渉チェックを例に説明すると、加工対象と工具との干渉チェックを行う場合には、図4. 17 (a), (b) に示すように加工対象をワークフレームに、そして工具をワークフレームに形状を定義す

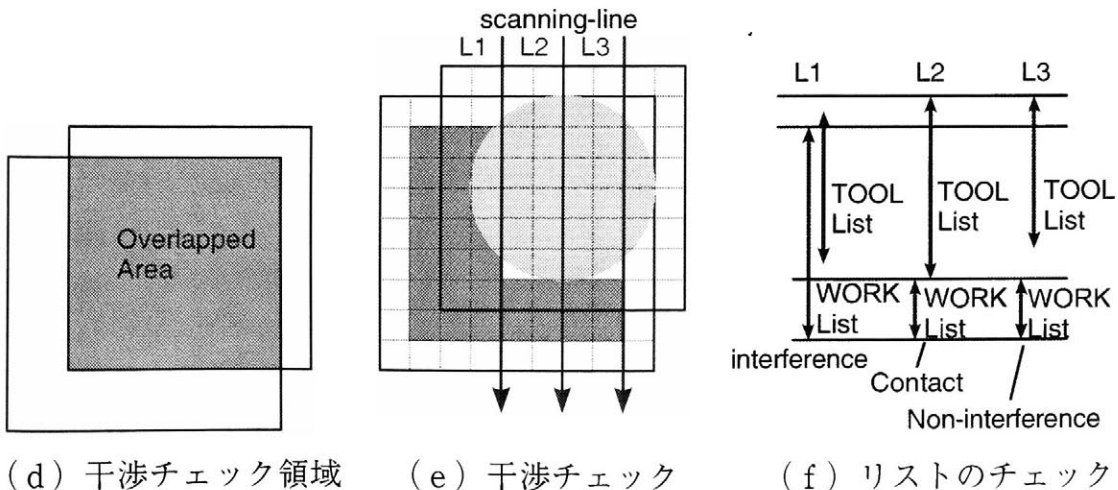
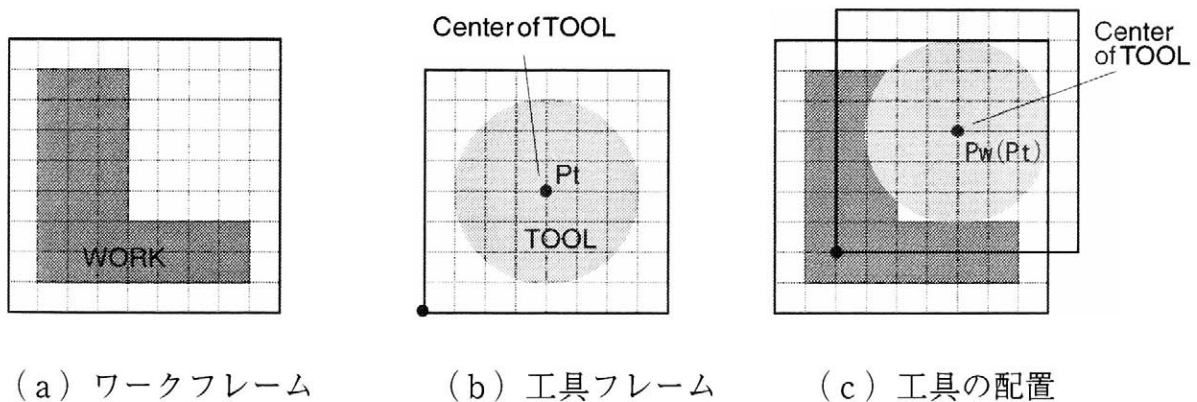


図4. 17 干渉チェック

る。干渉チェックは、図4.17(c)に示すように工具フレームをワークフレーム上の指定位置に置いたときに、それぞれの空間で対応するスキャンラインについて形状の重なりを検出することにより行われる。干渉チェックは図4.17(d)に示すように、フレーム間の干渉している領域の3次元空間のスキャンラインにおいてのみ実行することにより処理の高速化を図っている。そして、図4.17(e)のように対応するスキャンラインごとに図4.17(f)に示すように、各スキャンラインごとに干渉チェックを行う。その結果を基にXY, YZ, ZX平面ごとにまとめ、さらに各平面の結果から最終的にフレーム間の形状の干渉状態を決定する。この時、工具フレームとワークフレームの格子間隔は同じである必要があり、工具の指令位置も格子上に設定する必要がある。

干渉チェックの結果は、非干渉、接触、干渉のいずれかである。図4.18は二次元においてこれらの状態を示している。図4.18(a)に示すように、全てのスキャンラインにおいて形状の重なりが無い場合は非干渉、図4.18(b)に示すように、形状の重なりが無く接触する部分のみが存在する場合は接触、図4.18(c)に示すように、2方向以上に形状が重なる部分がある場合には干渉と判定する。Boundary-Mapでの干渉チェックは、この2次元での処理を3次元に拡張することにより実現している。

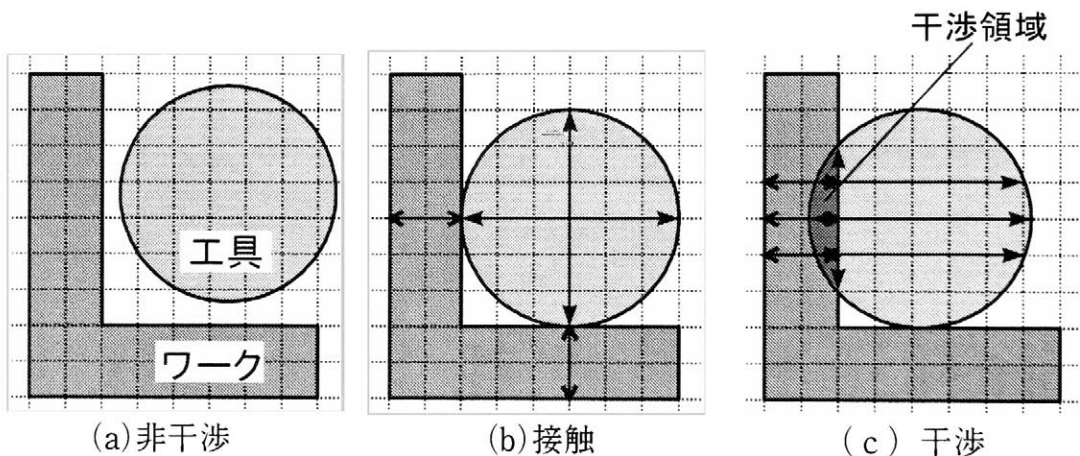


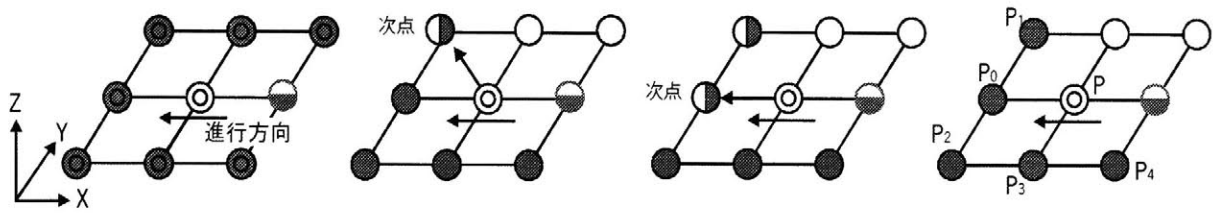
図4.18 干渉チェックの結果

4.7.2 次点探索

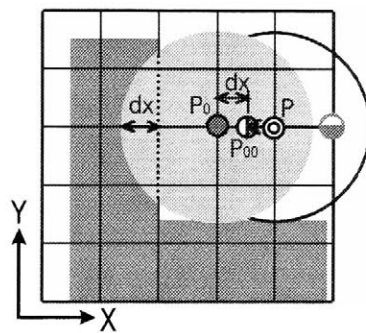
Boundary-Map形状モデルを用いて、接触方式で工具経路を求める場合、接触している現在位置から、次点を求めるために周囲8方向の位置から前回位置を除いた7方向の格子点上に工具を移動させた場合の、工具と加工対象形状の干渉状態を求め次点探索を行う。特に、周囲7方向の格子点上に工具を移動した場合に、周囲7方向の格子点上に接触点が求まらない時、干渉した状態の点の中から接触点を求める必要がある。XY平面での移動を例に、次点探索アルゴリズムを説明する。

図4.19(a)に示すように周囲7方向について工具を移動させた場合の探索結果が、図4.19(b)のように接触点が一つだけであった場合、この接触点を次点とする。図

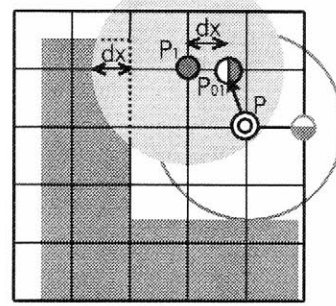
4. 19 (c) のように複数の接触点が求めた場合には、進行方向の接触点を次点とする。また、図4. 19 (d) に示すように周囲に複数の干渉点が求めた場合には、各干渉点 P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 における干渉量を求める。(d-1) のように P_0 点に移動した際の干渉量が格子間隔より小さい場合は、 x 方向に干渉量 dx だけ戻した位置である P_{01} を接触点とする。また、(d-2) のように P_1 に移動した場合は x 方向に dx 戻した位置 P_{11} が接触点となる。(d-3) のように dx, dy 方向に干渉量がある場合はそれぞれの量だけ戻した位置を接触点とするが、この場合は dy が格子空間より大きいので干渉点とする。同様に (d-4) の場合も dx, dy 共に格子間隔より大きいので干渉とする。この結果、 P_{00} と P_{01} が接触点となるが、進行方向にある P_{00} を次点とする。なお、この次の



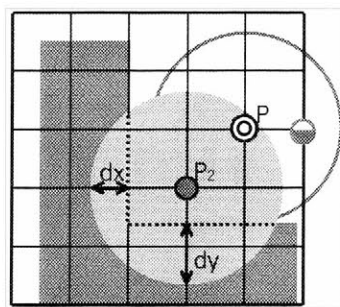
(a) 探索点 (b) 単一接触点検出 (c) 複数接触点検出 (d) 干渉点検出



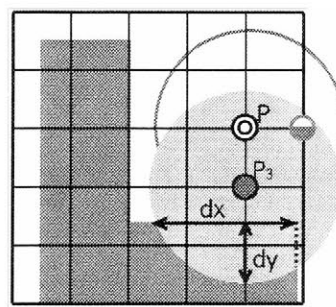
(d-1) P_0 点への移動



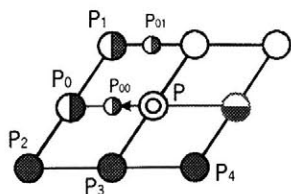
(d-2) P_1 点への移動



(d-3) P_2 点への移動



(d-4) P_3 点への移動



Current Position
 Adjacent Position
 Contact
 Non-interference
 Interference
 Pre-Position

(e) 次点探索結果

図4. 19 次点探索アルゴリズム

次点探索ではP₀点が前回の点となる。

このようにすることにより、格子間隔上に無い点であっても接触点を見つけることができるため、格子間隔以上の精度の工具経路を求めることが可能となる。また、周囲7方向について、前回の状態チェックで状態が判っている場合は、そのデータを利用し処理の高速化を図っている。

4. 7. 3 CAMシステムの構成

Boundary-Map 形状モデルによる工具経路生成の基本となるのは、工具と加工対象形状との状態を判断する干渉チェック機能と、干渉状態から次点を探索する次点探索機能である。これらの処理を組み合わせることによって、Boundary-Map 形状モデルによる工具経路の生成が可能となる。この二つの機能は、等高線工具経路や走査線工具経路の生成に共通の機能であり、これらをまとめて1つのCAMシステムとして構成している。

図4. 20にBoundary-Map 形状モデルに基づくCAMシステムの構成図を示す。入力としては、工具やホルダー等の加工の際に移動する形状を工具フレームに、加工対象となる形状やジグ等の固定される形状をワークフレームに定義し、Boundary-Map 形状モデルに変換すると共に、等高線と走査線の指定や加工領域の定義を加工パラメータとして与える。こ

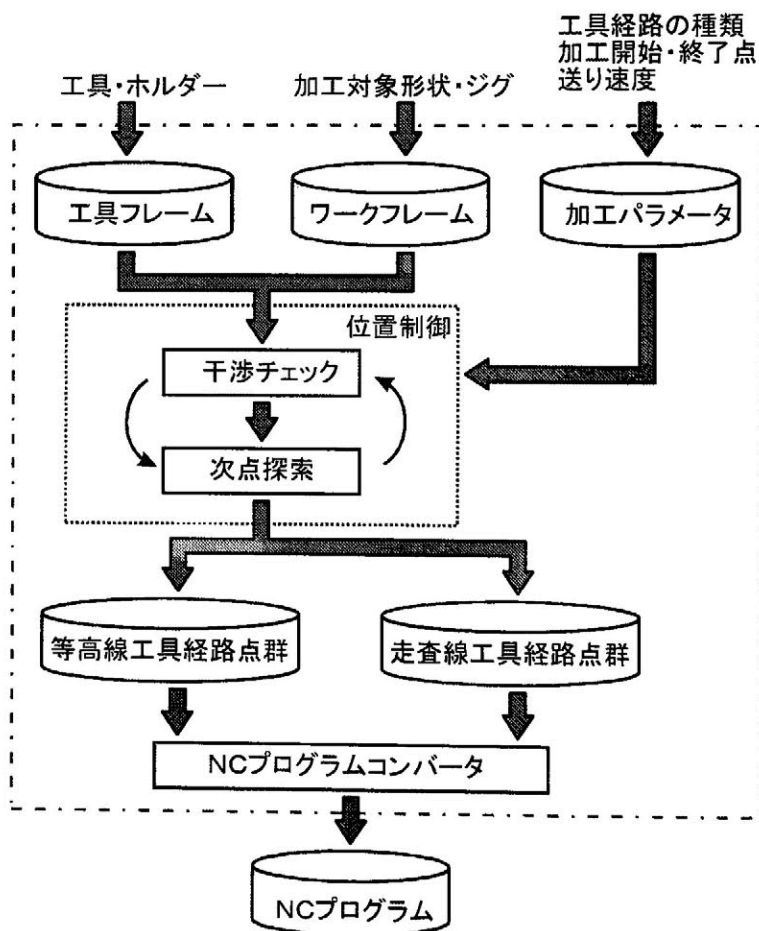


図4. 20 Boundary-Map 形状モデルに基づくCAMシステム構成図

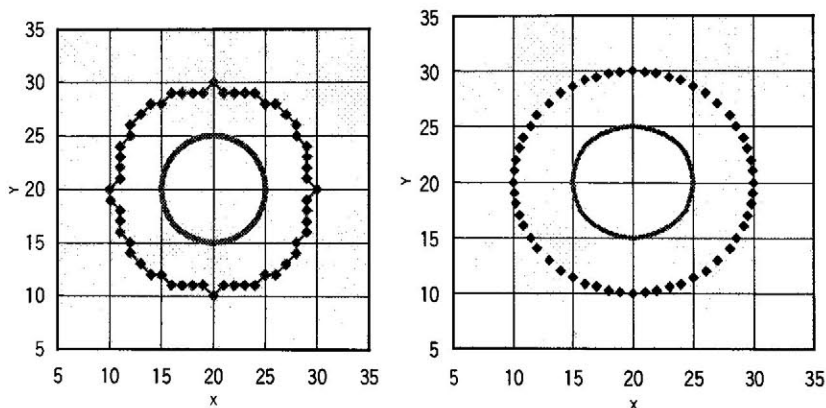
これらの情報から位置制御部において干渉チェックを行い，次点探索を繰り返して次点を求めていく．また，アプローチ経路やリトラクト経路は位置制御部において，工具経路に対応した点列を生成する．このようにして生成された点群は，等高線工具経路あるいは走査線工具経路点群として点列で蓄えられる．そして，最後にNCプログラムコンバータを通してNCプログラム化され出力される．

4. 8 等高線工具経路の生成と加工実験

4. 8. 1 等高線工具経路生成の概念

Boundary-Map形状モデルを利用して等高線工具経路を生成するには前述の接触点探索をXY平面内で行うことにより実現できる。しかし、実用化するには与えられた加工開始点から工具に接する間で移動させるアプローチ移動と加工終了点から加工終了点までのリトラクト移動を追加する必要がある。アプローチ移動は、加工開始点から指定方向に接触点探索を進め、形状に最初に接触する点までの経路をアプローチ移動とすることにより求められる。そして、この点を探索開始点とする。また、リトラクト処理は探索終了点（等高線工具経路の場合は探索開始点と同一）からZ方向に移動させ、リトラクト移動とする。これら、アプローチ移動、等高線工具経路、リトラクト移動をまとめることにより、指定された高さでの荒加工、中仕上げ・仕上げ加工の等高線工具経路が生成できる。

提案した接触点探索法により、円柱形状に対して、フラットエンドミルで工具経路を生成させ、同一格子間隔1mmでVoxel方式により求めた工具経路との比較を行った。円柱の半径は5mm、工具半径も5mmである。求めた円柱の等高線工具経路の比較結果を図4.21に示す。同図より、Voxel方式では格子間隔単位での工具経路しか生成できないのに対し、Boundary-Mapデータ方式の方が粗い格子間隔であっても滑らかな工具経路が生成できていることがわかる。



(a) Voxelによる等高線工具経路 (b) Boundary-Mapによる等高線工具経路

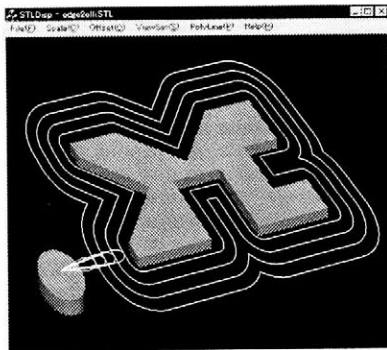
次に、生成される工具経路の精度を測定するため、図4.21で示した半径5mmの円柱を半径5mmのフラットエンドミルで等高線加工した場合の格子間隔と、工具経路の関係を測定した。測定結果を表4.1に示す。格子間隔は1から順に0.5, 0.25, 0.2, 0.124, 0.1と変化させた。

表 4. 1 工具経路の精度と格子間隔

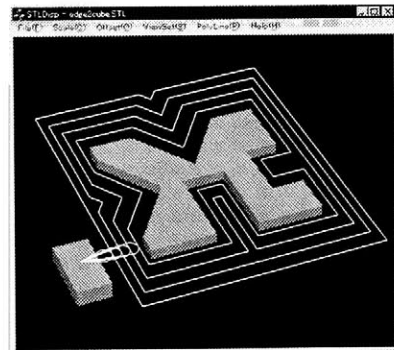
格子間隔 mm	1	0.5	0.25	0.2	0.125	0.1
誤差 mm	0.1005	0.0180	0.0047	0.0030	0.0014	0.0009

この表より、測定した条件においては格子間隔0.1mm程度で1 μ m程度の精度があることがわかる。この値は、工具経路の精度と格子間隔の関係の目安であるが、Boundary-Map形状モデルの格子間隔と精度の関係と同様に、要求精度を得るための格子間隔は要求精度よりも大きくても精度良く工具経路を生成できることがわかる。

また、図 4. 2 2 は非回転工具でかつ、楕円形状や直方体形状の工具により工具経路を生成した例を示している。図 4. 2 2 (a) は、図に示す楕円柱形状の工具を想定し、非回転で加工対象形状の周囲を接触するように移動させて求めた工具経路である。また、楕円工具の半径を変えて4つの半径について工具経路を生成している。工具半径が大きくなると凹部において自己干渉が回避されていることが判る。図 4. 2 2 (b) は、非回転の工具形状を楕円柱から直方体にした場合に生成された工具経路である。同様に、自己干渉が回避されている。この図より、非回転であっても、任意形状の工具であっても特別な処理を行うことなく、自己干渉も回避した工具経路が生成できることがわかった。



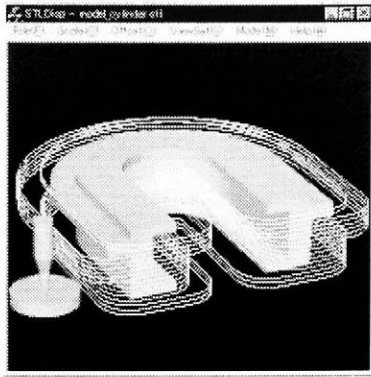
(a) 非回転楕円工具



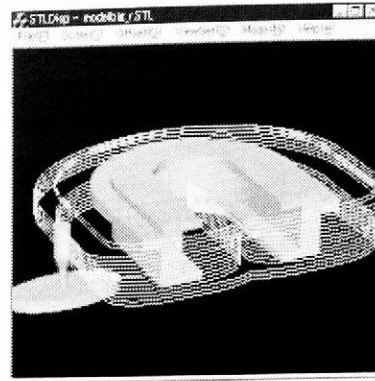
(b) 非回転直方体工具経路

図 4. 2 2 非回転工具への対応

さらに、Boundary-Map形状モデルではZ-map方式や拡張Z-map方式と異なり、オーバハング形状にも対応できるので、図 4. 2 3 に示すような工具であっても工具経路を生成できると共に、非回転でかつ任意形状工具にも対応できる。このため、Boundary-Map形状モデルを用いた接触法による経路生成はロボット等を用いた磨き加工にも応用可能であると考えられる。



(a) オーバハンク形状



(b) 非回転楕円工具

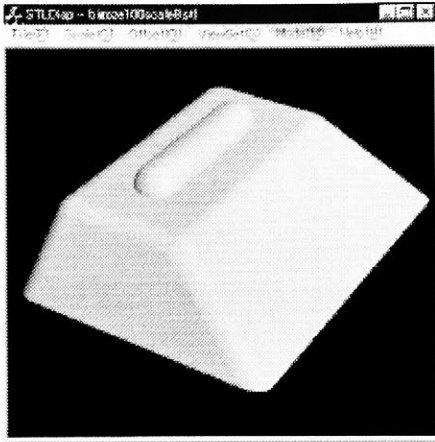
図4. 23 オーバハンク形状への対応

4. 8. 2 等高線工具経路の加工実験

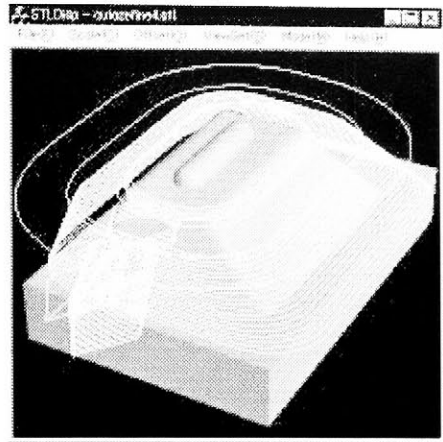
開発した工具経路生成アルゴリズムを用いて算出した等高線工具経路が、実際の加工に適用できるかを確認するため、CNC工作機械を用いて加工実験を行った。対象工作物は図4. 24 (a)に示すように、傾きの異なる傾斜からなる台形に半径5 mmのフィレットを張り、球と円柱を付加した形状で、縦80横120高さ45mmの大きさである。工具経路の生成に用いたデータは格子間隔を0.25mm単位としているので、Boundary-Mapのデータ表現による格子間隔基準の形状の大きさはそれぞれ、320, 480, 180となっている。

荒削りには $\phi 30\text{mm}$ のフラットエンドミルを使用し、等高線工具経路を生成させた。等高線のZ軸方向のピッチは1 mmである。図4. 24 (b)は、開発した等高線加工用工具経路生成アルゴリズムを用いて生成した荒削りの工具経路の例である。図4. 24 (c)は仕上げ加工の工具経路を示している。仕上げ削りは $\phi 5\text{ mm}$ のボールエンドミルを用い、Z軸方向のピッチは0.25mmで工具経路を生成した。また、図4. 24 (b)の前工具経路を生成するのに要した処理時間は、CPUに400MHzのPentium IIを用いて約6分を要し、1点の工具位置生成に平均14 msを要している。格子間隔が0.25mmであることから、この処理速度からリアルタイムでの送り速度を求めると、約1071mm/minとなる。これは、干渉チェックを含め、リアルタイムで約1071mm/minの送り速度で加工できることを意味しており、高速に工具経路が生成できていることがわかる。また、CPUの処理速度が向上すれば、リアルタイムでの加工も実現可能であると考えられる。

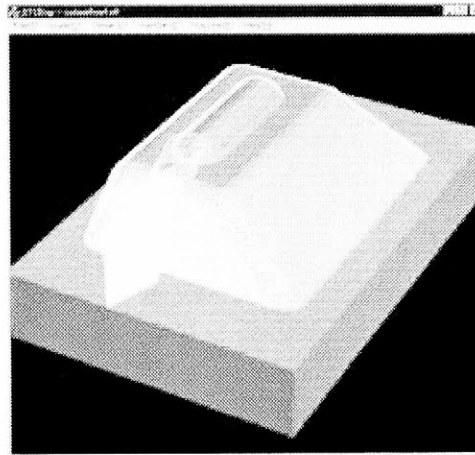
図4-25 (a)は、荒削り後の形状であり、図4-25 (b)は仕上げ削り後の形状である。加工材料はマシナブルワックスとS45Cとし、荒削りの主軸回転数は3000rpm、送りは2000mm/min、仕上げではそれぞれ6000rpm、1000mm/minの条件で加工を行った。実際に生成された工具経路データは格子間隔(0.25mm)より細かい間隔で生成されているが、使用したCNC工作機械が高速微少線分に対応していないため、今回の切削実験は工具経路データを1 mm間隔に変換して加工を行った。これらの加工において、パス落ちや食い込みは発生していない。



(a) 加工対象形状

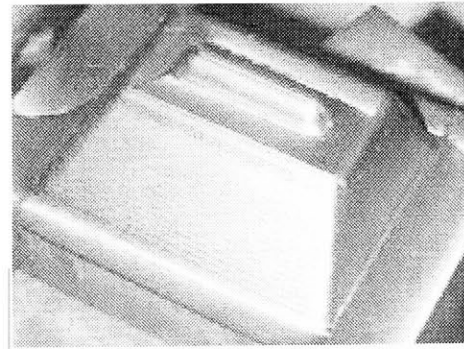
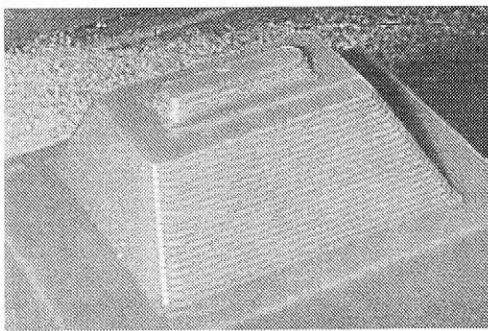


(b) 等高線荒加工用工具経路



(c) 等高線仕上げ加工用工具経路

図4.24 加工対象形状と等高線工具経路



(a) 荒削り終了後 (マシンブルワックス) (b) 仕上げ削り終了後 (S45C)

図4.25 加工後の形状

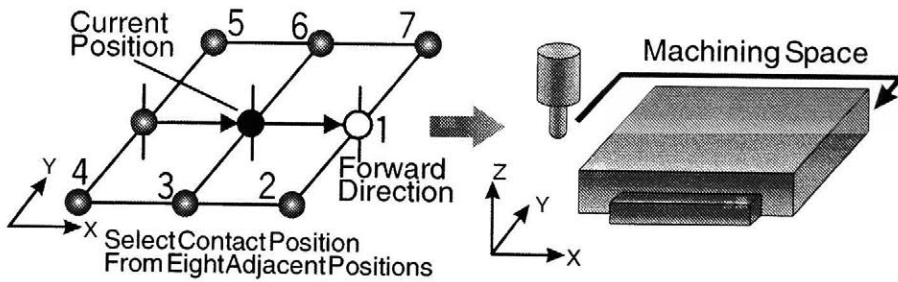
4. 9 走査線工具経路の生成と加工実験

4. 9. 1 走査線工具経路生成の概念

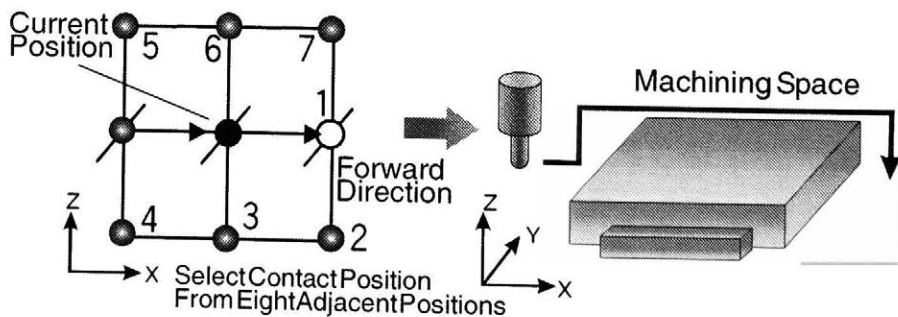
Boundary-Map形状モデルを用いて工具経路を生成する場合、工具経路生成アルゴリズムは等高線工具経路の場合、ドライブ面にある周囲7方向の格子点上に工具を移動させた際の、工具と加工対象形状との干渉状態から接触点を求め、次点とする処理を行っている。等高線工具経路生成の場合には、図4.26(a)に示すように工具はXY平面内の格子状の点を動くとし工具の現在位置からXY平面内の7方向の隣接点に対して接触点を求める。

一方、走査線工具経路生成では、等高線工具経路の場合のように工具の移動拘束平面がXY平面ではなく、図4-26(b)のように拘束平面をZX平面にすることにより等高線と同一のアルゴリズムで走査線工具軌跡を生成することができる。すなわち、走査線工具経路を生成する場合には、工具は次点をZX平面内で探索することになる。また拘束平面をYZ平面にするとY方向への走査線工具経路の生成が可能である。

工具はボールエンドミルとフラットエンドミルを想定したが、開発した工具経路生成法は非回転工具や任意形状の工具でもアルゴリズムを変えることなく、工具形状を変更するだけで対応できる。



(a) 等高線工具経路



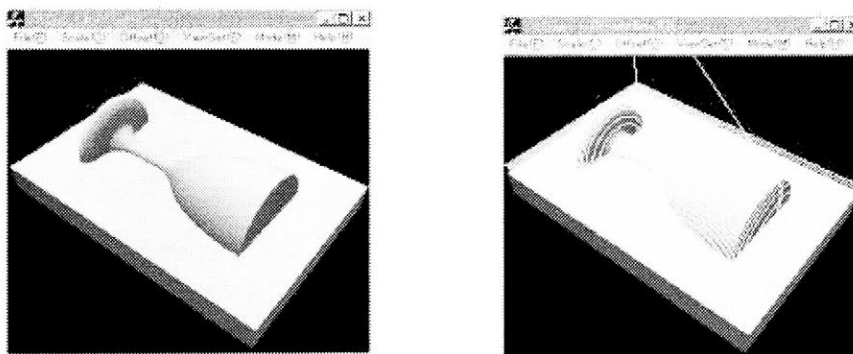
(b) 走査線工具経路

図4.26 加工後の形状

4. 9. 2 走査線工具経路の加工実験

開発した工具経路生成アルゴリズムを用いて走査線工具経路を算出し、実際にCNC工作機械を用いて加工できるかを確認するため、加工実験を行った。対象工作物は図4. 27 (a)に示すワイングラス形状で、縦80横120高さ40mmの大きさである。工具経路の生成に用いたデータは格子間隔を0.25mm単位としているので、Boundary-Mapのデータ表現による格子間隔単位の形状の大きさはそれぞれ、320, 480, 160となっている。加工材料はワックスとし、ワックスでの荒削りには試験的に $\phi 10\text{mm}$ のボールエンドミルを使用して工具経路を生成させた。走査線のY軸方向のピッチは15mmである。図4. 27 (b)は仕上げ削りの走査線工具経路の例である。仕上げ削りは $\phi 10\text{mm}$ のボールエンドミルを用い、Y軸方向のピッチは1mmで工具経路を生成した。図4. 27 (b)の工具経路を生成するのに要した処理時間は、CPUに400MHzのPentium IIを用いて、約1分40秒であり、1点の工具位置生成に平均4msを要している。格子間隔が0.25mmであることから、この処理速度からリアルタイムでの送り速度を求めると、約3750mm/minとなり、高速に工具経路が生成できていることがわかる。このことから、CPUの処理速度向上により、干渉チェックを含めリアルタイムでの加工も実現可能であると考えられる。

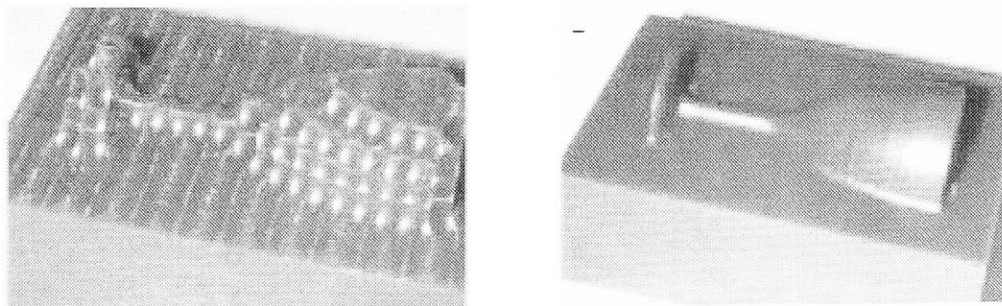
図4. 28 (a)は荒削り後の形状であり、図4. 28 (b)は仕上げ削り後の形状である。いずれも走査線工具経路で加工した。実際に生成された工具経路データは格子間隔



(a) 加工対象形状

(b) 走査線工具経路

図4. 27 走査線工具経路の生成例



(a) 荒加工後の形状

(b) 仕上げ加工後の形状

図4. 28 加工実験後の形状

(0.25mm)より細かい間隔で生成されているが、CNC工作機械が高速微小線分に対応していないため、今回の切削実験は工具経路データを1 mm間隔に変換して加工を行った。これらの加工においてパス落ちや食い込み等は発生していない。

4. 1 0 総括と結論

本章では、現在のCADシステムの動向について述べ、現在はCADシステム本来の目的であった形状を精度良く定義する形状モデルの議論から、使いやすいインターフェイスの採用や専用分野向けの機能開発に関する議論に移り変わってきていることを述べた。しかし、現在利用されている形状モデルは、CADシステムとしては十分利用できるようになってきているが、依然としてCAMシステムやNC加工シミュレーションに関しては、現在のCADシステムの形状データをそのまま利用するには、精度と処理時間に問題があることを示した。

そこで、本研究では3章においてCAMシステムに適したデータ構造を持つソリッドモデルとして空間格子法を基にしたBoundary-Map形状モデルを提案した。そして、本章において、提案するBoundary-Map形状モデルを用いてCADシステムが構築できるかを確認するため、CADシステムの基本機能である形状生成と編集についての機能開発を行い、Boundary-Map形状モデルに基づくCADシステムを開発した。

これらの結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 空間格子モデルに基づいたBoundary-Map形状モデルを用いて、形状の定義と編集、そして表示が可能であるBoundary-Map形状モデルに基づくCADシステムの基本システムの開発を行った。
- (2) プリミティブとして、2次曲面と平面からなる円柱、直方体、球、円錐、三角柱の入力を可能とし、プリミティブ生成が2次曲面と平面の交点問題により実行できることを確認した。
- (3) NURBS曲面から、Boundary-Map格子間隔に基づく微小三角形を生成することにより、NURBS曲面をBoundary-Map形状モデルに変換できることを確認した。
- (4) Boundary-Map形状モデルで表現された形状間において、形状を表しているリスト毎の演算によりセットオペレーションが実行できることを確認した。
- (5) NURBS曲面であっても、プリミティブ形状であっても、一度Boundary-Map形状モデルのデータに変換された後は、単純なリスト毎の演算によりセットオペレーションが可能であることを確認した。
- (6) スweep処理が、スweep軌跡を離散化した位置毎のセットオペレーションのOR処理によって実現できることを確認した。
- (7) Boundary-Map形状モデルの形状データから格子間隔単位の直方体(Voxel)を抽出し、直方体から面を取り出して描画することにより、Boundary-Map形状モデルが描画できることを確認した。

これらのことより、提案するBoundary-Map形状モデルは、CADシステムとしての基本的な機能を満足できることが明らかになった。

さらに、本章では、Boundary-Map形状モデルを用いて、高速にそして高精度な工具経路が生成できるかを確認するため、工具経路を生成する手法について検討した。工具経路の生成手法には、加工中における工具の変形や異形工具、非回転工具、実時間加工に対応するため、オフセット法を用いず、接触法を用いた。

Boundary-Map形状モデルで工具経路を生成するため、加工対象と工具とをBoundary-Map形状モデルで定義し、それぞれをワークフレームと工具フレームに設定した。そして、両フレーム内にある工具とワーク間の干渉チェックを行うことにより、工具を常に加工対象に接触するように移動させて生成された軌跡を工具経路とする手法を開発した。この手法を実現するため、Boundary-Map形状モデルにおける干渉チェック機能と、干渉状態から次点の接触点を探索する次点探索機能を開発した。そして、この機能を用いたBoundary-Map形状モデルに基づくCAMシステムを構築すると共に、等高線工具経路と走査線工具経路の生成に応用し、工具経路を生成する時間を測定した。また、生成された工具経路に基づいて実際に加工が可能であることを確認するため、加工実験を行った。

これらの結果を要約すると以下のようなになる。

- (8) 工具経路生成手法として接触法をBoundary-Map形状モデルに適用し、干渉チェック機能と、次点探索機能により工具経路を生成するアルゴリズムを開発した。
- (9) 開発した工具経路生成アルゴリズムに基づき、等高線工具経路と走査線工具経路を生成するBoundary-Map形状モデルに基づくCAMシステムを構築した。
- (10) 生成した工具経路は、格子状にない位置において接触点を算出できるため、精度良く工具経路が生成できることを確認した。また、同一格子間隔であればVoxel方式に比べて精度良く工具経路が生成できることを確認した。
- (11) 開発した工具経路生成アルゴリズムを用いることにより、非回転工具、異形工具であっても、工具経路の生成が可能であることを確認した。また、オーバハングを持つ形状に対しても、同一のアルゴリズムを用いることにより、工具経路が生成できることを確認した。
- (12) 等高線工具経路と走査線工具経路において、干渉チェックを含めて次点を探索するのに要した平均時間は、CPUに400MHzのPentium IIを用いてそれぞれ14msと4msであり、0.25mm以下の細かい線分での高精度な工具経路を高速に生成できることを確認した。そして、CPUの高速化によりリアルタイムでの加工の可能性を示すことができた。
- (13) 等高線と走査線の工具経路において処理時間の違いより、次点探索の周囲7カ所において非干渉になる可能性が高い走査線工具経路の方が、高速に処理できることを確認した。
- (14) 開発したCAMシステムにより生成された等高線工具経路と走査線工具経路により加工実験を行った結果、実際にCNC工作機械を用いて加工できることを確認した。

これらのことから、提案する Boundary-Map 形状モデルは、高速に高精度な工具経路を生成でき、CAMシステムに適した形状モデルであることが明らかになった。

Boundary-Map形状モデルのNC加工シミュレーションへの適用については第6章で詳しく述べる。

参考文献

- [118]松岡, 古賀他: CAD/CAMの賢い選び方・使い方, 機械技術, 第46巻, 第1号(1998), pp.34-51
- [119]例えば, PDMの次のソリューション CPCシステムが相次ぎ登場, 日経CG, Vol167, 8(2000), pp82
- [120]穂坂衛, 佐田登志夫: 統合化CAD/CAMシステム, オーム社, (1994), pp. 29
- [121]中西康二: CIMからIMSへ, 産業図書, (1991)
- [122]木崎健太郎: 三次元CADの選び方, 日経デジタルエンジニアリング, No.32, 8(2000), pp.100
- [123]大滝, 井澤, 森重, 浅川, 竹内: X線CTスキャナを用いた3次元CADデータに基づく内部形状評価, 精密工学会誌, 65, 11(1999), 99.1584
- [124]日本図形学会編: CGハンドブック, 森北出版(1989), pp135
- [125]佐藤義雄: 入門グラフィックス, アスキー出版, (1990)
- [126]高桑昌男: CGレイトレ物語, アスキー出版, (1991)
- [127]穂坂, 東, 齋藤, 久志本: CAD/CAMにおける曲線曲面のモデリング, 東京電機大学出版局, (1996)
- [128]日経CG編著: CADの基礎知識, 日経BP社(1994), pp123
- [129]Ron Fosner: OpenGL Programming for Windows95 and WindowsNT (日本語版), アジソン・ウエスレイ出版(1997)
- [130]松田晃一訳: Win32 OpenGLプログラミング, プレンティスホール(1996)
- [131]鈴木裕: 3次元CAD/CAM, 型技術, 第11巻, 第1号(1996), pp.24
- [132]青柳, 岩田: INCAMの実用化と型作りの高精度化・自動化, 型技術, 第9巻, 第3号(1994), pp.42
- [133]近藤司, 岸浪健史, 齋藤勝政: 逆オフセット法を基にした形状加工処理, 精密工学会誌, 54, 5(1988), pp971
- [134]野中智博, 鈴木裕, 塩田聖一: 干渉線投影法に基づくCAD/CAMシステムの開発(第1報)基本概念, 1998年度精密工学会春期全国大会学術講演会講演論文集, pp. 33
- [135]神谷昌秀: 倣いシミュレーションに基づく曲面加工システムの開発, 九州工業大学学位論文(1996)
- [136]村橋晋一: 解析的アプローチによる工具経路計算の新方式, 1993年度精密工学会周期全国大会学術講演会講演論文集, (1993), pp.437
- [137]入口健二, 加藤清敬: 自由曲面分割による工具経路生成方法, 精密工学会誌, 64, 11(1998), pp1618-1622

第 5 章

Boundary-Map 形状モデルに基づく 高能率荒取り加工システムの開発

5.1 はじめに

主軸の高速化や数値制御装置の高速・高精度制御技術の開発，さらにはクーラント技術，高性能工具の開発により，金型を素材から直接削り出す直彫り加工法が確立され実用化されてきている^[138]．この手法を用いることにより，金型の加工精度が向上し，磨き行程などの後工程の省略あるいは短縮が可能となるため，この加工法は金型の納期の短縮や生産性の向上を実現する重要な手法となってきている．

一方，金型加工に代表される3次元形状の切削加工において，荒取り加工は除去体積が最も多いため，荒取り加工の生産性を向上させることは，全行程の効率化に大きく貢献する．高速高精度加工を目指す場合には，送り速度の高速化だけでなく，加工効率を考慮した工具経路を生成することも重要な要因となる．

従来，荒取り加工時には大きな径のラフィングエンドミルにより軸方向および半径方向の切り込みを大きくして加工能率を上げようとしていた．しかし，この方法では工作機械の負荷が大きく，切り残しも多くなることから次行程への移行がスムーズにできなかった．そこで，さまざまな手法が試行錯誤され，現在のCAD/CAMシステムにおいて，実用的な加工ノウハウがソフトウェア化されCAMシステムに実装されるようになってきている．これらのCAMシステムにおいて用いられている荒取り加工法には，ドリルの穴加工による荒取り加工法，形状断面のオフセットによる荒取り加工法，円錐荒取り加工法，段階的荒取り法などが用いられている^[139]．また，従来は放電加工などに頼ってきたZ方向に深い形状に対しても，パーティカルカッターを用いた突き加工（パーティカル加工）法^[140]がCAMに取り込まれ効果をあげている^{[78][141]}．

さらに，近年の高速高精度加工に基づく加工では，直彫り加工法を基に最小限の工具を用いて，荒取り加工や中仕上げ加工における切り込みを小さくし，高速送りによる加工能率を向上させる加工法に変化している^[142]．この加工法に対応するためには工具負荷を低減させる必要があるため，等高線工具経路でかつダウンカット切削となる方向に工具を移動させる必要がある^[143]．この手法は工作機械や工具への負荷が少ないうえ，熱による工具の変形も少ない．また，この加工法を利用して，高速な荒取り加工を実現する手法として，一発大荒カケ上がり加工法が提案されている^[144]．この手法は，図5.1(a)に示すように，工作物の情報からエンドミル側刃を最大限に利用し，階段状に①②の順に一発大荒加工を行う．その後，一発大荒加工で残された大きな階段状の除去部分を，図5.1(b)に示すように，③④⑤⑥の順に，下方から上方に向かって駆け上がりながら段差を小さくする2段階からなる加工法である．この一発大荒カケ上がり加工法もCAMシステムの新しい機能として組み込まれている^[145]．

このような高速加工を行う際，たとえ等高線工具経路でかつ低切り込みであっても，除去量の急激な変動は工具の折れやチッピングの原因となる．例えば図5.2に示すような等高線工具経路におけるくぼみ部においては，1刃当たりの切削量が増大し，結果として大きな負荷変動を生じる．特に，荒取り加工での高速な送りに対して小径工具を用いた場合は，コーナ部での軸送り方向変化による衝撃や切削負荷の増大により，摩耗の増大や折損を容易に生じる．このような工具の負荷が急激に変動する箇所は，工具の進行方向が急

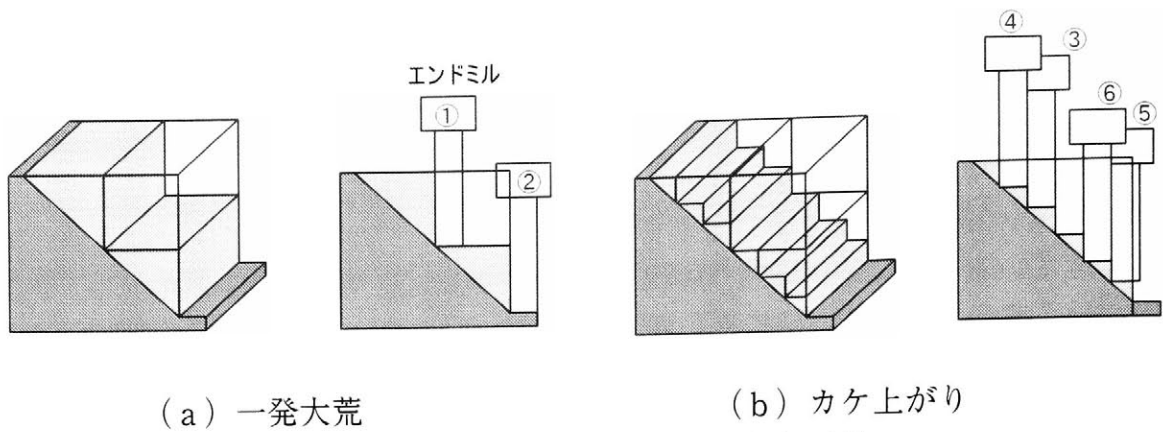


図 5. 1 一発大荒カケ上がり加工法

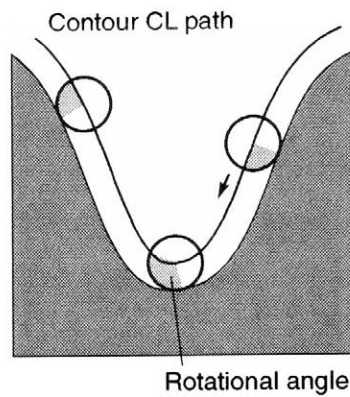


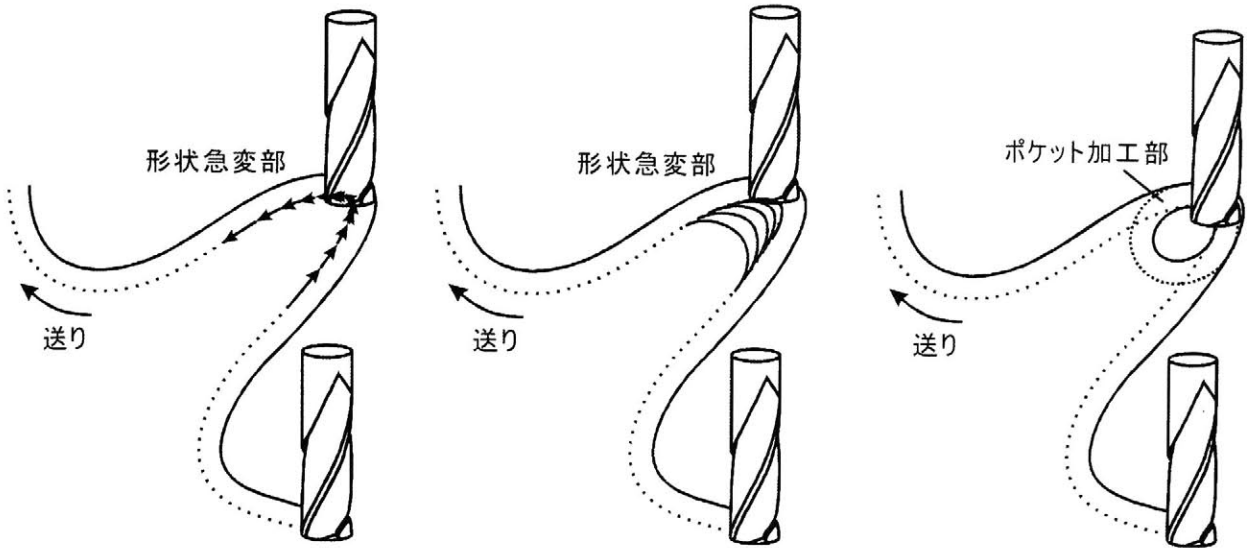
図 5. 2 形状急変部

激に変化する箇所，すなわち形状急変部であり，等高線工具経路では多数存在する．

形状急変部における工具負荷を低減する方法として，図 5. 3 に示す以下の 3 つの手法が考えられる^[146]．

- (1) 送り速度を変化させ，1 刃当たりの除去量を調整する
- (2) 切り込み方向に対して半径方向切り込みが小さくなるように工具経路を追加する
- (3) 形状急変部を等高線加工する前にスパイラル加工等を用いて除去する

現在のCAMシステムでは(1)，(2)の手法が用いられているが，(1)の手法では送り速度が低下し，加工時間の増大を招く問題が生じる．また，(2)の場合は工具経路の追加や新たな工具経路に対する干渉チェックが必要となると共に，工具経路が追加されるため，加工時間が増大する問題が生じる．このように(1)，(2)の手法では，加工時間を短くすることは難しい．(3)の場合には，スパイラル加工後の等高線で，空切削と切削を繰り返すために速度の調整が必要となる．しかし，空切削から切削になる際の除去量を調節することが可能となれば，加工時間の短縮には最も効果的である．Boundary-Map形状データは，形状断面を点列で保持しているため，点列から曲率半径を求めることにより，形状急変部の検出が容易であり，干渉チェックも容易に実行できる．このことから，本研究では(3)の手法を用いて加工の効率化を実現するアルゴリズムの開発を行う．



(a) 速度制御 (b) 複数の切り込みパスの挿入 (c) 事前のポケット加工

図5.3 工具負荷低減の手法

一方、負荷変動なしに高能率な加工を行う手法として、直線状の工具経路主体の工具移動による加工法が考えられる。同一体積除去を行うに当たり、工具経路に直線が多いほど送り速度を高速にすることができるため、加工時間を短縮することができる。この手法を用いることにより、生成されるNC情報量を大幅に圧縮でき、加工時の除去変動がないことから、更なる高速送りを実現できるため、荒取り加工において高能率な加工が可能となる。

直線状の工具経路を生成するに当たり、加工形状と素材から除去部を求め、除去部をできるだけ大きなブロックに分割し、そのブロック部分を直線状の工具経路で加工する手法が提案されている^[147]。しかし、この手法はブロックに分割していくため、図5.4に示

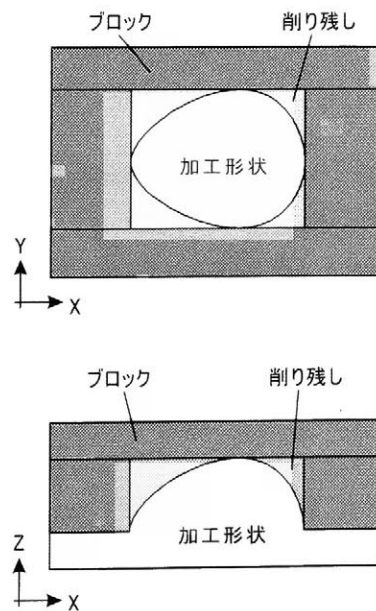


図5.4 ブロック分割による領域の検出

すような形状では、ブロックと加工形状の間に削り残しが生じ、後工程が必要となる。そこで、本研究ではBoundary-Mapデータの特徴を生かして、削り残しを生じない直線状の工具経路を効率よく生成する手法の開発を行う。

本章では形状急変部に対して事前にポケット加工(穴加工)を用いて工具負荷変動を低減すると共に、負荷変動の少ない直線主体の工具経路による荒取用工具経路を生成する手法を組み合わせることにより、高能率加工を実現する工具経路生成手法について述べる。

5. 2 加工前穴加工用工具経路の生成

5. 2. 1 形状急変部の検出と工具経路の生成

前述したように、高速送りでの形状急変部は、工具負荷の著しい変動を招き、加工精度や工具破損の原因となる。形状急変部におけるこのような1刃当たりの除去量の急激な変化を減少するひとつの方法として、加工する前に形状が急変する部分をあらかじめ穴加工する方法が考えられる。すなわちある高さにおける等高線荒取り加工を行う前に、等高線荒取り加工経路から各位置における曲率半径を求め、工具の負荷変動が大きくなると考えられる領域を取りだし、その領域にあらかじめ穴加工を行う方法である。

Boundary-Map方式を用いたCAMシステムにおいて、等高線工具経路は点列として求まるので、得られた点列より各箇所の曲率半径を求め、穴加工が必要な領域を算出することができる。Boundary-Mapデータ構造に基づくCAMシステムにおいて計算される工具経路は、微小点列で表現されている。このため、図5.5に示すように、点列の3点からなる2辺を用いて円弧中心を求め、求まった円弧半径を曲率半径とする。

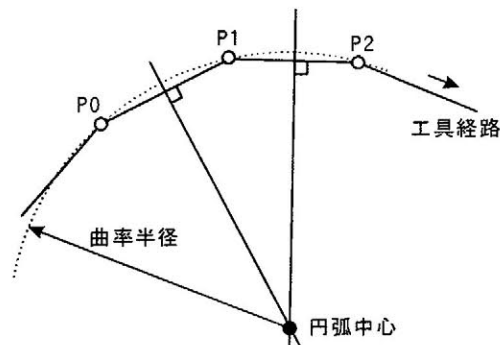
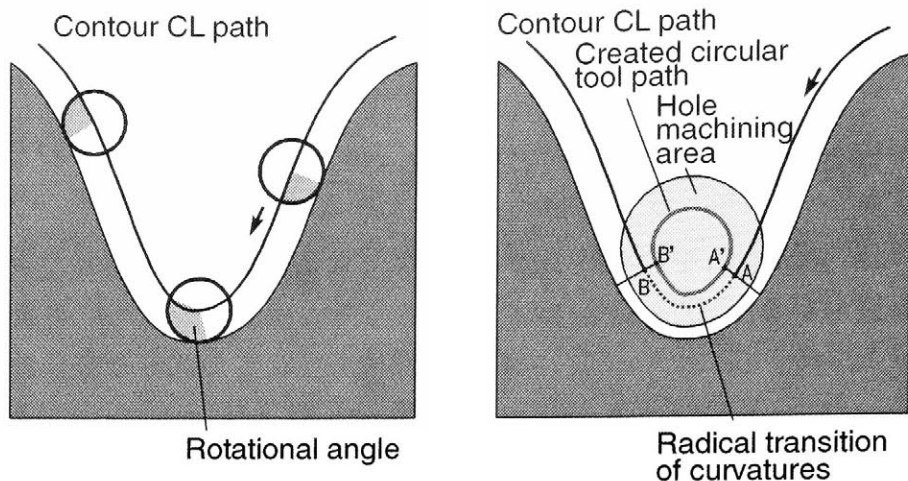


図5.5 曲率半径の算出

次に、曲率半径を基に、求めた形状急変部に対して穴加工を行う工具経路生成手順について述べる。例えば、図5.6(a)に示す溝形状に対して、指定された曲率半径より小さい領域を求め、図5.6(b)に示す穴加工が必要な領域A-Bを求める。穴加工の経路は、穴加工が必要な領域A-Bに対して削り代の量だけオフセットした経路A'-B'が穴加工の工具経路となる。ここでオフセット量を設定するのは、穴加工後の等高線加工において空切削が生じ、切削負荷の変動が発生しないようにするためである。次に、閉じた穴加工経路とするために、開いたA'-B'には円弧補間を挿入する。また、1回の穴加工の円経路で円弧内部に削り残しが生じる場合は、さらに内側にオフセットした円弧経路を作成する。なお、自己干渉領域などの干渉チェックは事前にBoundary-Map方式の等高線工具経路生成時に考慮されているので、工具の切り込みは発生しない。

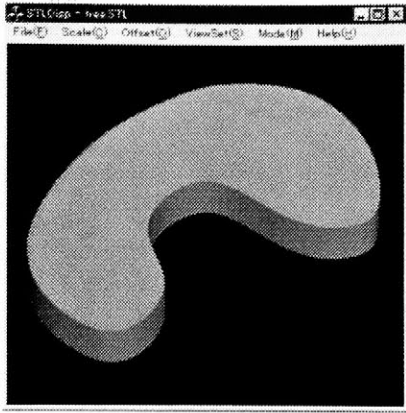


(a) 形状急変部 (b) 加工前穴加工経路

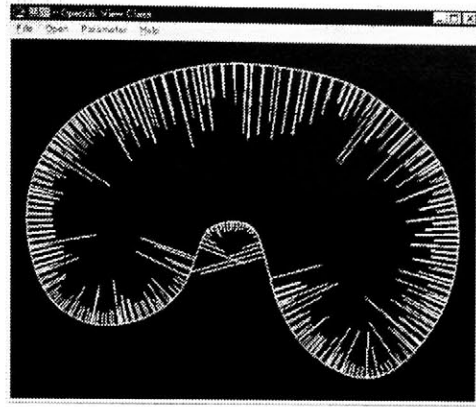
図5.6 加工前穴加工の概念

5.2.2 加工前穴加工用工具経路生成例

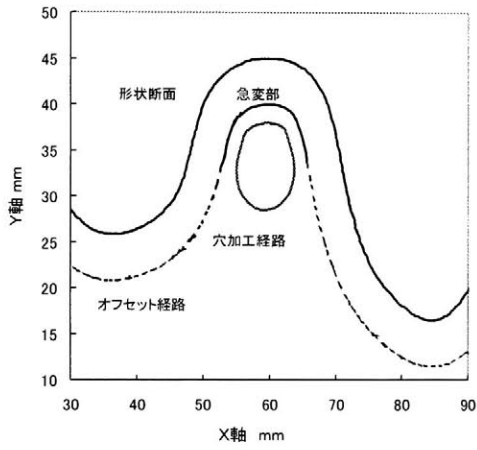
加工前に穴加工を行う工具経路を、提案する手法によって生成した結果について次に述べる。具体例として、図5.7(a)に示す形状を用いる。まず、指定された高さにおける等高線工具経路を求め、この経路より図5.7(b)に示すような曲率半径を求める。工具経路はBoundary-Map方式に基づくCAMシステムが算出した点列を用いる。そして、各点列における曲率半径を求め、与えたパラメータ半径より連続的に大きな個所を探索し、形状急変部を求める。ここではパラメータとして与える曲率半径を工具半径の2倍としている。また、曲率半径は3つの半径の平均をとって計算している。さらに、図5.7(c)に示すように、求めた急変部に対しオフセットをかけると共に、穴加工する為の工具経路を作成する。対象形状の場合、図5.7(d)に示す穴加工用工具経路が最終的に生成される。



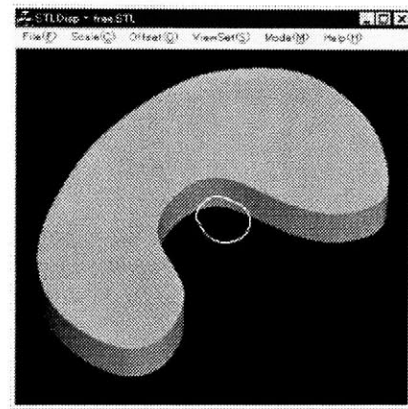
(a) 対象形状



(b) 曲率半径



(c) 加工前穴加工経路算出



(d) 穴加工用工具経路

図 5. 7 加工前穴加工経路生成例

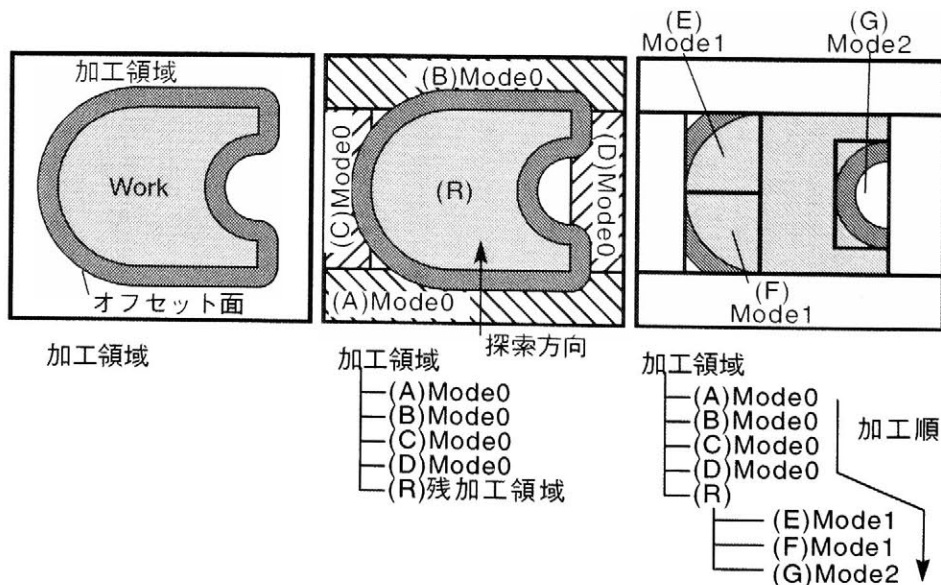
5. 3 長手方向切削に基づく工具経路の生成

5. 3. 1 長手方向切削用加工領域の分割

荒取り加工における直線切削の効率的な工具経路を生成するための方法として、長手方向切削に基づく荒取り法^[147]が提案されている。本研究では、この考え方を基に、荒削りにおける削り残しをできるだけ少なくする新たな工具経路生成アルゴリズムを検討した。なお、ここではコア形状を想定している。

検討したアルゴリズムについて図5. 8 (a)に示した等高線加工におけるある断面形状を例に説明する。工具経路生成に当たり、まず加工形状に対し、Boundary-Map方式の等高線工具経路生成アルゴリズムを用いてオフセット断面点列を求める。次に、図5. 8 (b)のように、加工領域の周囲から最も長く直線で移動できる方向から探索を行う。この場合、長手方向から奥へ進め、形状断面に当たるまでの領域をMode 0とする。この手順により、周囲4方向にMode 0 (A~D)が生成され、領域Rが残される。さらに、残っている領域Rから四角形のブロックを取りだし、加工領域Rを図5. 8 (c)のように二つのMode 1 (E, F)とMode 2 (G)に分類する。Mode 1は、四隅の1隅が加工外にある領域で、Mode 2は四隅の2隅が加工外である領域である。残りの領域に、まだ加工領域がある場合は、これらの各領域内を探索し、全ての未加工領域が無くなるまで領域の分割を繰り返していく。領域の分割法は、工具の移動経路が軸に平行であるためBoundary-Map方式では簡単に探索することができる。

このように、周囲から順に形状の奥に作られていった加工領域は、Aから順にGまで分割されるが、分割された順番は加工する順序を示している。すなわち、これらの領域はA



(a) 加工対象領域 (b) 外周からの探索 (c) 分割終了

図5. 8 長手方向切削に基づく領域分割

から順にGまで加工していくことにより、常に形状の外周から切り込み一定で加工を行うことができ、工具へ与える負荷変動を低減することができるため、高速送りが実現可能である。

5. 3. 2 加工領域における工具経路生成

上記の方法で求めた各領域に対し、図5. 9に示すように、各モードに対応した工具経路を発生させる。Mode 0では、図5. 9 (a)に示すように外側から工具の半径ずつ切り込みを入れて行きオフセット面を最終とする工具経路を生成する。Mode 1では、図5. 9 (b)に示すように長手方向でかつ形状の外から経路を生成して行き、各経路はオフセット面に達するまでとする。また、Mode 2の場合には、図5. 9 (c)に示すように開いた面から深さ方向に工具経路を生成して行き、各経路は両側のオフセット面の間とする。各工具経路の加工開始点と終了点には、オフセット面と接する円弧のアプローチを設ける。

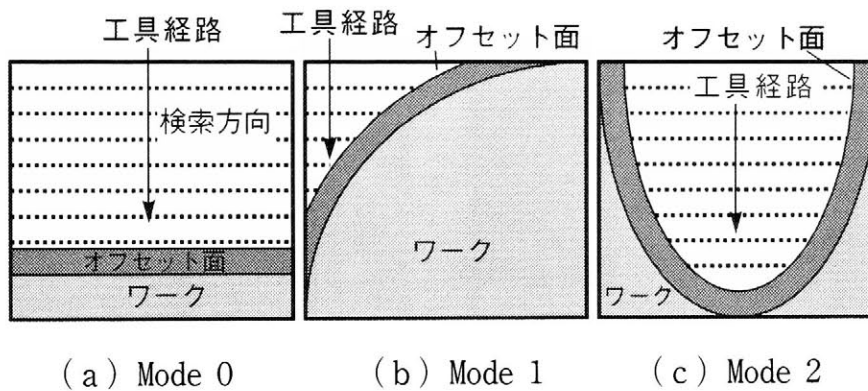
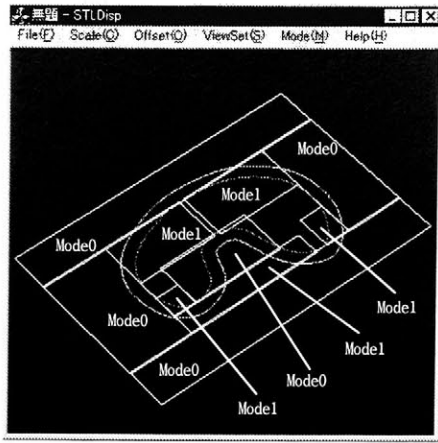


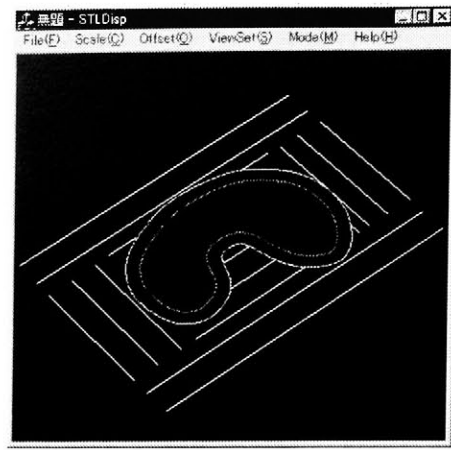
図5. 9 領域モードにおける工具経路

長手方向切削に基づく工具経路生成の手法を用いて、領域の分割と、領域毎の工具経路を生成させた結果を次に示す。工具経路生成の対象形状として、図5. 7 (a)に示す形状を用いた。

対象形状に対して領域を分割した結果が図5. 10 (a)である。Mode 0の領域が4個、Mode 1が5個、そしてMode 2が1個となっている。そして、図5. 10 (b)に示すのが各領域に対して生成された工具経路である。同図より、各領域に工具経路が生成できていることがわかる。



(a) 領域分割



(b) 領域ごとに生成した工具経路

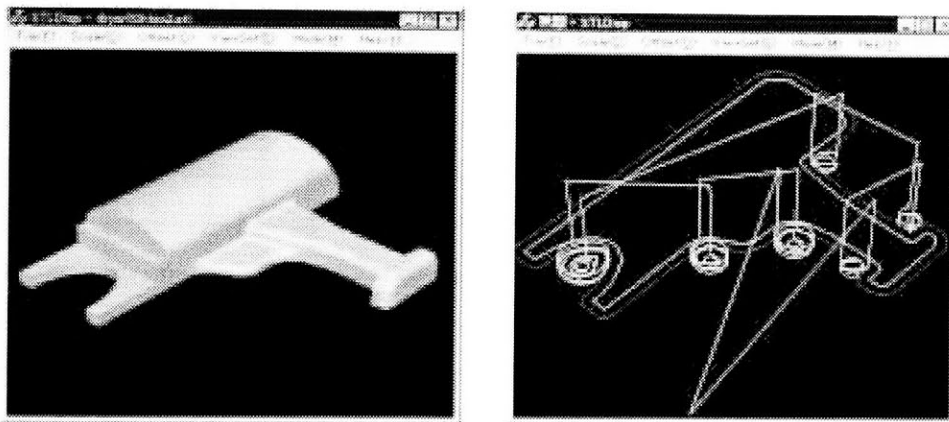
図 5. 10 長手方向切削に基づく工具経路生成例

5. 4 加工実験と評価

5. 4. 1 加工実験

提案する高能率荒取り加工用の工具経路生成手法を用いて実際に加工できるかを確認するため、図5. 1 1 (a) に示すハンドドライバーケースの形状について加工実験を行った。図5. 1 1 (b) は提案するアルゴリズムによって形状の底面を加工するために生成された穴加工用工具経路を示している。曲率半径は、工具半径の2倍に設定している。同図より、6カ所について、形状急変部が検出され、穴加工用工具経路が生成されていることがわかる。また、円弧経路が大きい箇所には、内側にオフセットされた円弧経路が挿入されている。

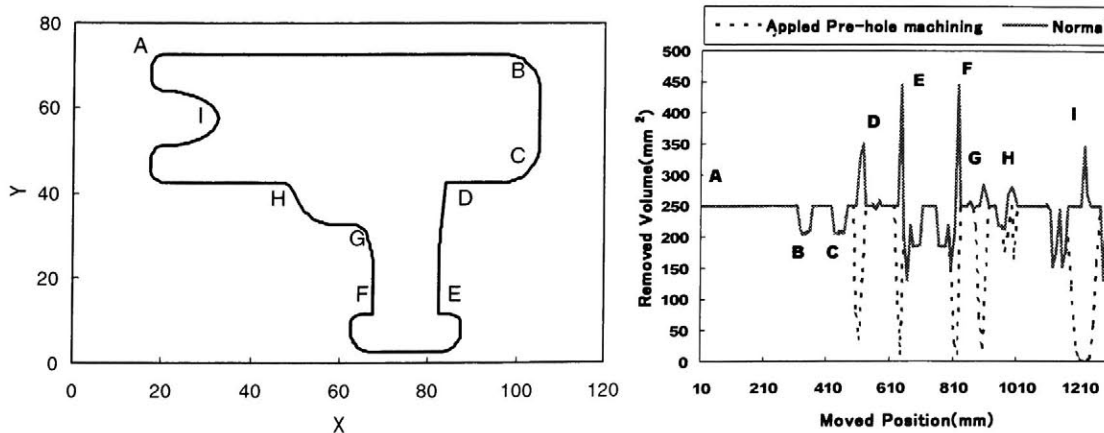
図5. 1 2 は事前の穴加工の有無によって等高線の輪郭加工を行う際の除去量がどの程度変化するかについて比較した図である。図5. 1 2 (a) は工具経路であり、図5. 1



(a) 加工対象形状

(b) 加工前穴加工工具経路

図5. 1 1 加工前穴加工工具経路



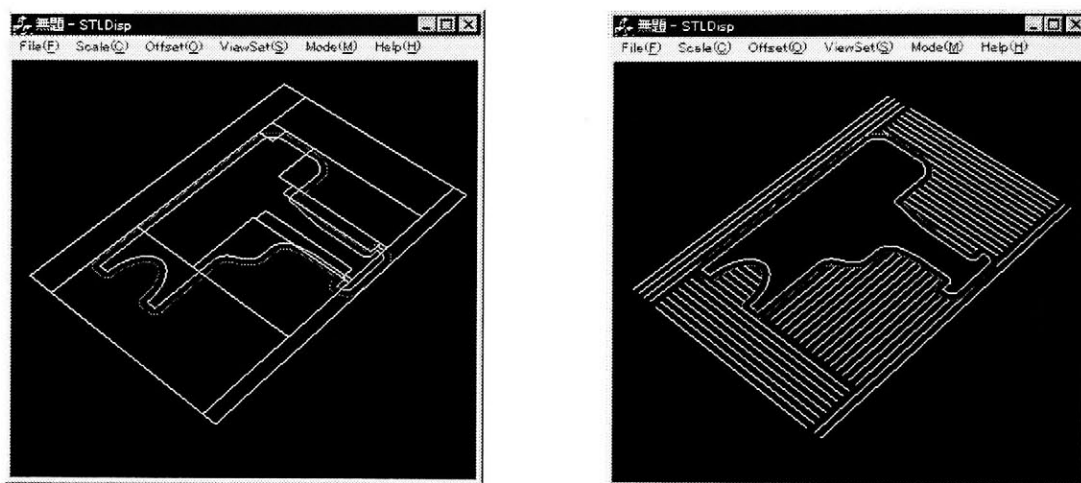
(a) 等高線工具経路

(b) 除去量

図5. 1 2 加工前穴加工工具経路による除去量の比較

2 (b) は除去量を比較した図である。形状急変部である E, F の箇所において、事前に穴加工を行わない場合には、除去量が急激に 2 倍ほどに増大している。一方、事前に穴加工を行った場合には、除去量が減少し、急激な除去量の増大が発生していない。ただし、この図の場合は事前穴加工におけるオフセット量を (図 5. 6 参照) ゼロとしているため、穴加工された領域からされていない領域に加工が移るとき、除去量がゼロから急増するが、実際の加工ではオフセット量を設定し、除去量がゼロになることを防いでいる。同図より、事前に穴加工を行うことにより、形状急変部における除去量すなわち工具負荷が低減できていることがわかる。

また、図 5. 13 (a) は底面において長手方向切削に基づいて検出した領域であり図 5. 13 (b) は、領域ごとに算出した工具経路である。実際に底面において加工を行う場合、図 5. 11 (b) で示した事前の穴加工工具経路により加工を行った後、図 5. 13 (b) に示す工具経路で加工を行う。これを等高線の各高さにおいて実施し高能率な荒取り加工を行う。



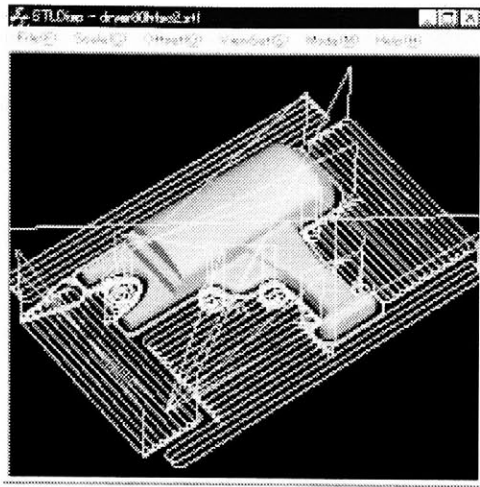
(a) 底面における領域分割

(b) 領域ごとの工具経路

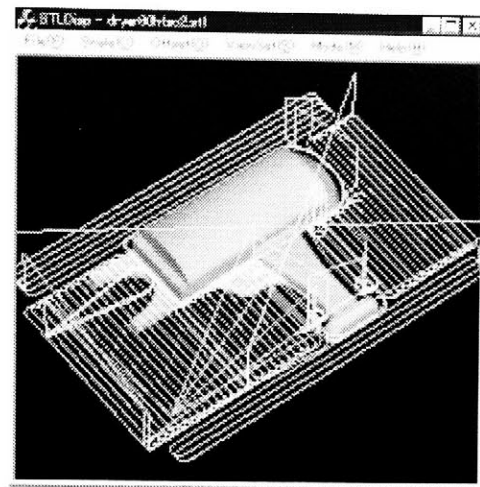
図 5. 13 長手方向切削に基づく工具経路生成例

実際の加工実験には、CNC 工作機械を用いてマシナブルワックスを加工した。加工する Z 方向の高さは 20mm で、2.5mm ピッチに等高線工具経路を求め、提案する手法を用いて高能率荒取り加工用工具経路を生成し、加工実験を行った。CNC 工作機械の性能により、主軸の回転数は 6000rpm で、送り速度は 2000mm/min とした。対象形状は図 5. 11 (a) に示す形状で、ワークのサイズは 120, 80, 40 であり、内部的には格子間隔を 0.25mm としているため、Boundary-Map 空間における格子単位での空間サイズは 480, 320, 160 である。また、工具は半径 5 mm のフラットエンドミルを用いた。

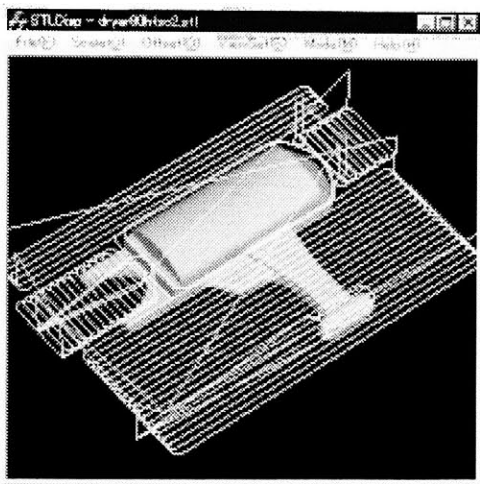
図 5. 14 (a) は高能率荒取り加工による底面 (高さ 0mm) での工具経路、図 5. 14 (b) は、高さ 2.5mm での工具経路、図 5. 14 (c) は高さ 10mm での工具経路である。それぞれの工具経路生成に要す時間は、CPU に 400MHz の Pentium II を用いて、数十秒であり、高速に工具経路を生成できている。また、図 5. 14 (d) は、仕上げ加工用の工具経路を示している。



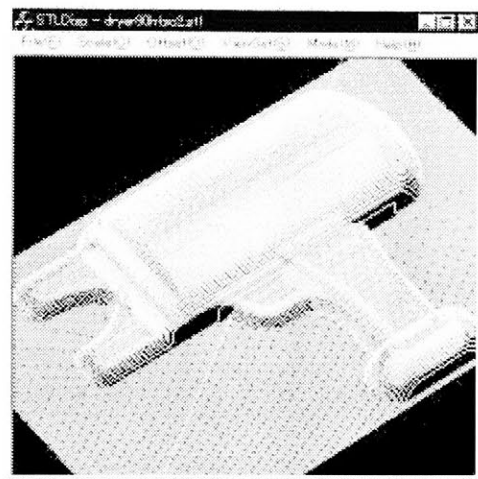
(a) 生成した工具経路(Z=0)



(b) 生成した工具経路(Z=2.5)

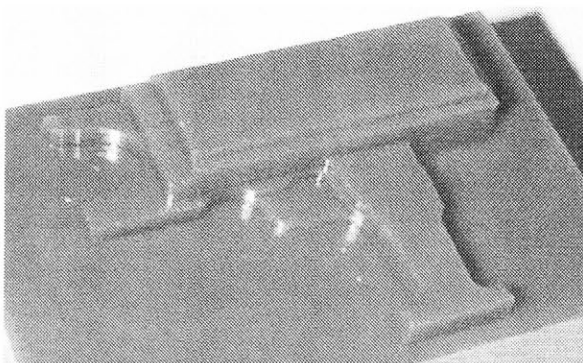


(c) 生成した工具経路(Z=10)

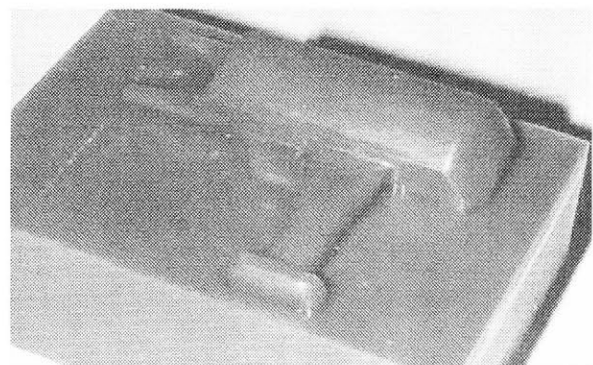


(d) 仕上げ加工用走査線工具経路

図 5. 1 4 生成した工具経路



(a) 荒加工終了後の形状



(b) 仕上げ加工終了後の形状

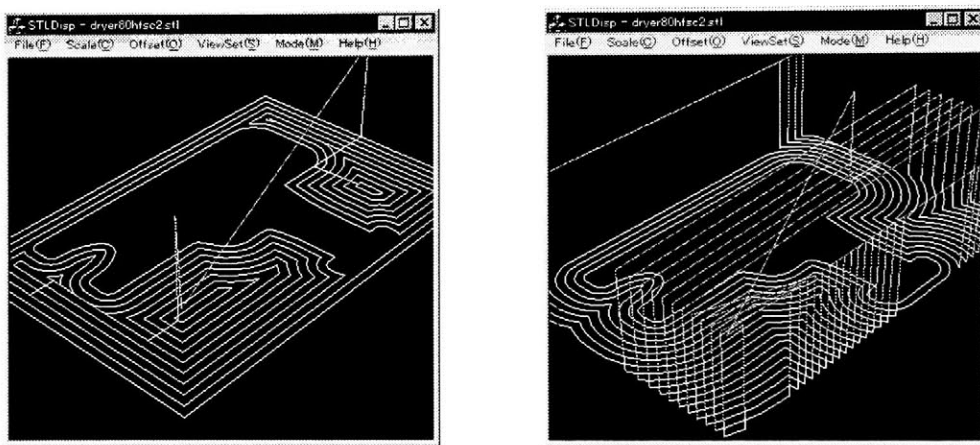
図 5. 1 5 加工後の形状

これらの工具経路を用いて、荒取り加工を終了した後の形状が図5.15(a)であり、仕上げ加工後の形状が図5.15(b)である。

5.4.2 汎用システムとの比較

提案する手法で生成した工具経路と同一条件で市販の2.5次元CAMによって生成された工具経路を比較した。図5.16(a)は市販のCAMを用いてポケット加工により生成した工具経路であり、図5.16(b)は輪郭オフセット加工により生成した工具経路である。表5.1はこれらの工具経路のブロック数を比較した結果である。同図より、ブロック数に関しては、ポケット加工が少し多い程度で、大きな差はみられない。

図5.17は工具経路の長さから求めた加工時間を比較した結果である。切削送りは500mm/minで早送りは6000mm/minとして計算を行った。同じ送り速度ではBoundary-Map方式を用いた場合が最も時間を要している。しかし、高能率荒取り加工システムが生成した工具経路は、ポケット加工や輪郭オフセット加工における工具経路に比べ形状急変部が



(a) ポケット加工 (b) 輪郭オフセット加工

図5.16 汎用CAMによる工具経路

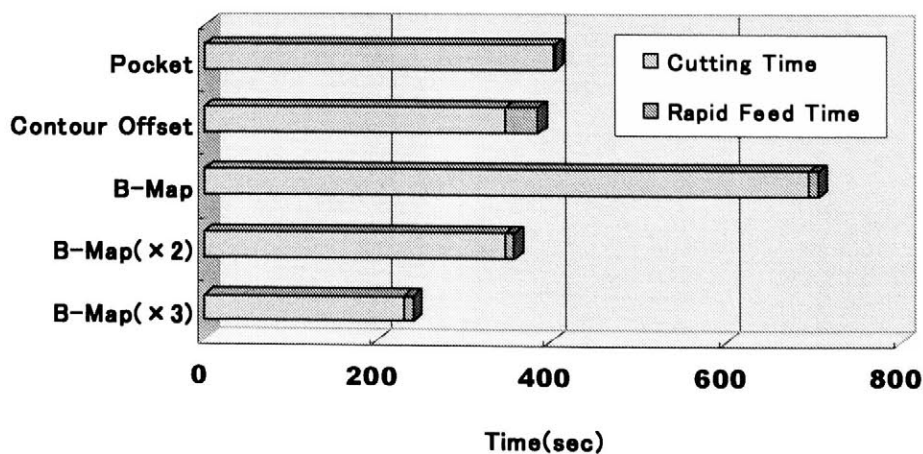


図5.17 加工時間の比較

少ないため、高速送りが可能な工具経路であると考えられる。単純に全ての箇所を送り速度を上げることはできないが、送りを2倍(B-Map×2)にすることにより加工時間は約1/2に縮小でき、3倍(B-Map×3)にするとさらに高速化が可能である。送りを2倍にすると、ポケット加工やオフセット加工と同様程度、3倍にするとポケット加工や輪郭オフセット加工に比べて、最も速く加工できることが明らかになった。

表5. 1 ブロック数の比較

Cutting Method	Number of Blocks
B-Map	372
Contour Offset	364
Pocket	424

5. 5 総括と結論

本章では、高能率な荒取り加工を実現するため、等高線工具経路における高速送り時に、問題となる負荷変動を低減させるため、事前に穴加工を行う工具経路を生成させる手法を提案すると共に、自動的に穴加工要の工具経路を生成するシステムを開発した。また、高能率な荒取り加工を実現するために、加工領域をできるだけ直線的な工具経路により加工できる工具経路を生成する手法を提案すると共に、Boundary-Map形状モデルを用いて自動的に生成するシステムを開発した。

さらに、開発したこれら二つの手法を組み合わせ、Boundary-Map形状モデルに基づく高能率荒取り加工システムを構築すると共に、実際に加工できるかを確認するため、CNC工作機械を用いて実加工を行った。最後に、生成した工具経路がどの程度、高能率荒取り加工を実現できているかを確認するため、汎用のCAMシステムにおいて、一般的な加工法であるポケット加工とオフセット加工用工具経路を生成させ、開発した高能率荒取り加工システムが生成した工具経路と比較を行った。

これらの結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) Boundary-Map形状モデルを用いて、形状急変部における事前穴加工用工具経路と、加工領域に対して直線を主体にした工具経路を生成することが可能であることを確認した。また、 x 、 y 、 z の各軸に平行な方向に対して形状の情報を持つBoundary-Map形状モデルは、長手方向切削における領域探索において高速な処理の実現に有効であることを確認した。
- (2) 等高線工具経路において事前に穴加工を行うことにより、形状急変部における除去体積の著しい増大を低減できることを確認した。除去体積の増大は工具に対する負荷の増大を意味するため、事前に穴加工を行うことにより、形状急変部での工具負荷を低減できる。
- (3) 荒取り加工における工具経路を直線主体にする長手方向切削に基づく工具経路により、移動距離は増大するが、ブロック数の増大が無く、送り速度を上げることが可能であることを確認した。切削送り速度を上げることにより、さらに高速な加工を実現できる。
- (4) 形状急変部における事前穴加工用工具経路と、加工領域を直線による工具経路を生成するシステムを開発し、生成された工具経路を用いて加工実験を行い、実際に加工が行えることを確認した。

これらの開発を通して、Boundary-Map形状モデルのデータ構造が、加工領域探索に有効であることが明らかになった。また、提案する二つの手法を組み合わせることにより、高速な送りに対応できる高能率な工具経路を生成できることが明らかになった。

なお、本章で生成した工具経路はコア形状に限定しており、さらに現状では等高線工具経路における複数の島ができる形状に対応していないなど、問題は多い。さらに、対象とした形状も数個にとどまり、さらに複雑な形状においての検証を行っていない。しかし、

基本的な考え方としては、十分使用できる機能であり、さらなる開発を行うことにより実用化を目指すことが今後の課題となる。

参考文献

- [138] 林幹二：パソコン3次元CAM，機械技術，第47巻，第1号(1999)，pp57
- [139] 鈴木裕：NCデータの自動作成は可能か，型技術，第13巻，第9号(1998)，pp.27-31
- [140] 酒井利幸：3次元CAD/CAMとバーチカルカッタによる高能率深彫り加工，ツールエンジニア，1997年12月号，pp.66-69
- [141] (株)グラフィックプロダクツ：CAM-TOOL，CAM機能説明書
- [142] 松岡甫篁：ここまでの高速切削加工技術，機械技術，第47巻，第9号(1999)，pp17
- [143] 鈴木裕：3次元CAMのメリットと活用ポイント，機械設計，第43巻，17号，臨時増刊号(1999)，pp.38
- [144] 福井雅彦，高橋百利：高硬度金型材の高効率切削加工の研究，型技術，第10巻，第7号(1995)，pp.26-27
- [145] 中尾健二：金型荒取り加工の新技术——発大荒・カケ上がり加工——，機械と工具，1998年，3月号，pp.51-56
- [146] 鈴木裕：高速加工の効果を上げるためのCAMの活用術，型技術，第14巻，第8号(1999)，pp19.
- [147] 是澤宏之，鈴木裕，森崎修：高能率金型荒加工システムの開発，精密工学会誌，Vol.64，No.5(1997)，pp.711-715

第6章

Boundary-Map 形状モデルに基づく高速 高精度NC加工シミュレーションの開発

6.1 はじめに

消費者ニーズの多様化に伴い、製品のモデルチェンジの回数が増加すると共に、要求される製品形状は曲面を多く含む複雑な形状になってきている。要求形状の複雑化に伴い、要求される金型加工のNCデータ容量も増大してきている。一方、NCデータの作成は自動プロからCAD/CAMシステムを利用するようになり、CAD/CAMシステムにはソリッドモデルが使用されるようになってきている。また、CAMシステムは、複雑な形状を効率的に切削する機能を搭載しており、作成されるNCデータもパス落ち等の不具合がほとんど生じないほど安定化してきている。さらに、工作機械の性能や数値制御装置(CNC装置)の発展により、複雑な金型を短時間に高速切削する高速加工技術が実現されてきている。

しかし、金型を高速、かつ高精度に、そして容易に加工する環境は確立されつつあるが、加工現場での切削ミスは一向に減少せず、ワークやツールの破損、また高速加工機ではスピンドルの破損が発生しており、納期短縮を妨げる大きな要因となっている。特に、高速加工になるほど工具、工作機械に与えるダメージは大きくなる。これらの原因は加工時のミス、オペレータの不手際も考えられるが、問題のほとんどは依然として、NCデータに依存していることが多い^[148]。

CAD/CAMシステムの機能は高度化され、加工条件、加工形状に対してさまざまなパターンで工具経路を生成できるようになってきている。しかし、CAMシステムがNCデータを作成する段階において、モデル形状と型材形状は与えられてはいるが、切削の各工程毎の結果すなわち素材が削られてゆく過程はまったく見えないという問題点は、今だに存在している。各切削行程において、今から切削するNCデータがどのような形状のワークを削るのかを知ることは必須情報である。これは、工具の進入位置、異常な削り残し部の有無、早送り時のZ方向高さ、切削送りでエアカット部の有無などの判断が熟練者でも困難であることによる。なかでも工具とワークの異常な衝突などは主軸交換が必要になるなどダメージが大きい。

このため、一般には加工前に実機による検証を行ったり、試し削りを行うことが多い。しかし、これらの作業は、ひとつひとつのNCプログラムの長さが膨大になってきている今日、検証に多くの時間を必要とする。CAD/CAMシステムとCNC装置の高速化によって、高速なNCデータ生成と高速加工が可能になると、NCプログラムの検証が、加工工程全体のボトルネックとなりかねない^[143]。

このため、実加工を行うことなく、工具とワーク素材、そしてNCプログラムから、加工途中の形状や加工終了時の形状を高速に描画し、確認できるNC加工シミュレータが導入され効果をあげている。NC加工シミュレータの導入により、試し削りの時間や加工材コストの低減、生産効率の向上が可能となる。また、近年の加工シミュレータは、製品とNC加工シミュレーション終了後の形状との比較、ホルダと工具の干渉チェック、動作モードの確認のための機能が豊富に用意されている。さらに、工具移動による切削量により、工具負荷を一定にするために送り速度を最適化する機能やエアカットの減少、干渉による工具位置の変更、工具軸の変更などのさまざまな最適化機能が開発されている^{[149][150]}。

しかし、現在のNC加工シミュレータは、曲面加工などに用いられる微小線分のブロックからなるNCプログラムのNC加工シミュレーションを行うには多くの処理時間を要する。また、画面のサイズや、描画設定の条件によって処理時間が大きく変化する^[149]。さらに、視点により加工後の精度がばらつき、計算精度が安定していないなどの問題が生じている。

さらに、高速高精度加工が実現しつつある現在、加工に要求される精度は今後数 μm オーダーになってくると考えられる。このような精度で加工を行うには、従来は考慮していなかった、CNC装置の制御特性、加工中における工具のたわみや熱変形などの物理現象も考慮したNC加工シミュレーションの実現が必須となる。しかし、現状でCNC装置の制御特性から加工中の物理現象までを考慮した高精度なNC加工シミュレーションを行うには、ソリッドモデルを用いての形状処理が必要となり、多大な計算時間を要する^[150]。一方、形状を離散化したデクセルモデルが処理を高速化するため利用されているが、この方法でたわみなど、格子間隔以下の微小な変形に対応するためには膨大なメモリ容量を必要とすると共に、処理時間が増大する。

本研究では、工作機械の運動誤差や工具のたわみなどの物理的要因に対応できるNC加工シミュレーションとして、空間格子法に基づいたBoundary-Mapデータ構造による形状モデルを用いたNC加工シミュレーション手法を提案している。NC加工シミュレーションの加工中における誤差要因としては、CNC装置の制御系における誤差の代表として運動誤差を対象とし、物理的要因の代表としては工具のたわみを対象としている。これらは、加工中における誤差に対して大きな影響を与える要因となる^[151]。

本章では、Boundary-Map形状データを用いてNC加工シミュレーションを行うための処理の概要と、シミュレーションの実行結果、そして汎用のNC加工シミュレーションと比較した結果について述べる。また、除去量の算出を用いて切削送りにおけるエアークット部を除去する手法についても述べる。さらに、ドゥエルや補間、さらにサーボ処理を含めたCNC内部の制御処理をエミュレートし、運動誤差による円弧半径減少を再現すると共に、加工中の除去量より工具のたわみを求める手法について述べる。そして、加工実験により得られた形状誤差と、NC加工シミュレーション後の形状から得られた誤差を比較した結果について述べる。

6. 2 NC加工シミュレーション

NC加工シミュレーションを実行する際に用いられる手法には、大きく分けて二つの手法がある。ひとつは、高速な描画を目標に開発された手法であり、他方は正確で精度の高いNC加工シミュレーションを目標として開発された手法である。高速な描画を目標とするシステムは、汎用のシステムで多用されている手法であり、NC加工シミュレーションの除去処理にコンピュータグラフィックで用いる手法を適用している^{[152][153]}。

図6.1は、コンピュータグラフィック技術を用いた際のNC加工シミュレーションの過程を示している。図6.1(a)に示すように、素材形状は、視点から画面を構成するピクセルを通る直線を結んだレイ(Ray)を基に構成されるデクセル(Dexel)によって表現されている。デクセルは、図6.1(b)に示すように拡張Z-Map方式^[154]を採用し、リストによって前後のデクセルデータと関連付けられている。この方式を用いることにより、複雑な形状の表現が可能となる。形状の除去は、図6.1(c)のように、素材を構成している各デクセルについて、1ブロックでの工具の移動軌跡を基に、工具の移動により生成された掃引形状(Swept Volume)と、交差している領域を算出し、交差している

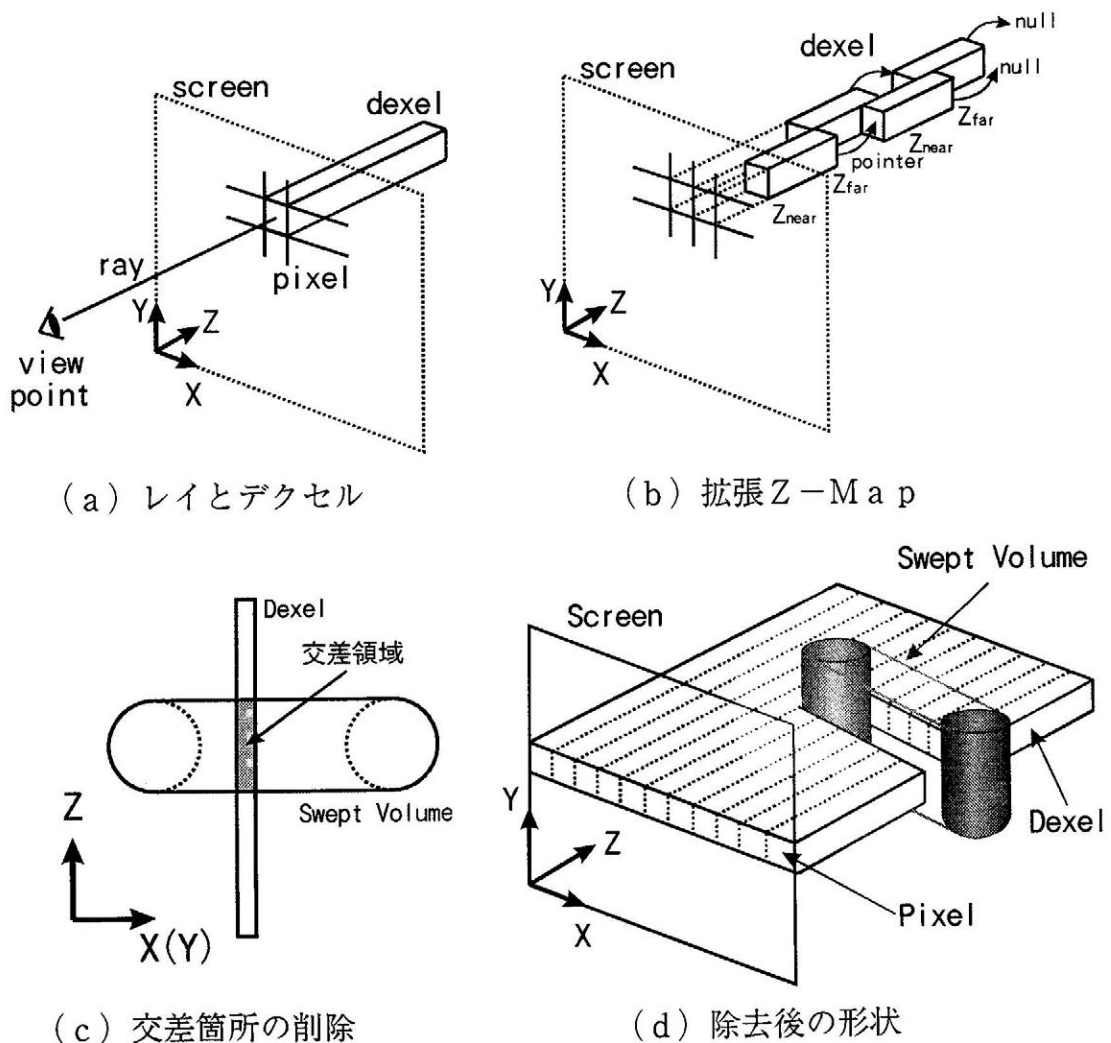


図6.1 CG技術に基づくNC加工シミュレーション

部分を除去することにより，図6. 1 (d) に示すように工具が移動した後の加工形状を表現することができる^[155]。

この手法を用いることにより，加工後の形状の描画は，画面の各ピクセルに対応するデクセルを直接画素データとして描画できるため，高速な描画が可能となる^{[156][157]}。しかし，画面のサイズや，画面に占める形状の大きさによって処理速度が大きく影響を受けると共に，視点によってNC加工シミュレーション後の形状の精度がばらつくことが問題となる。また，視点を変更した場合には，再計算が必要となる。

もうひとつの手法は，形状モデルにCSGやB-Repのようなソリッドモデルを用い，形状の除去処理によってNC加工シミュレーションを行う手法である^{[158][159]}。図6. 2に示すようなブロック移動の除去の際には，1ブロックの工具移動により作成される工具の掃引形状を求め，素材形状とのセットオペレーションの差演算により形状の除去処理を行っている。

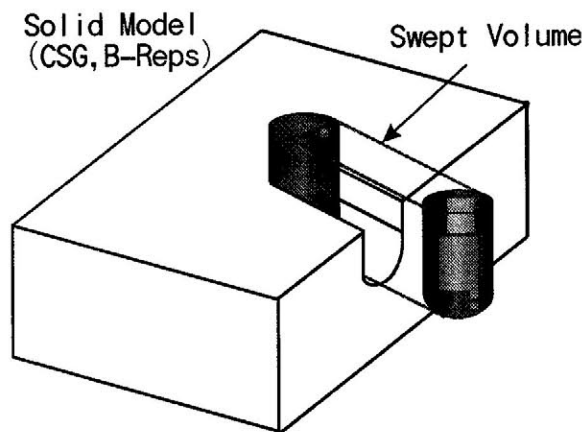
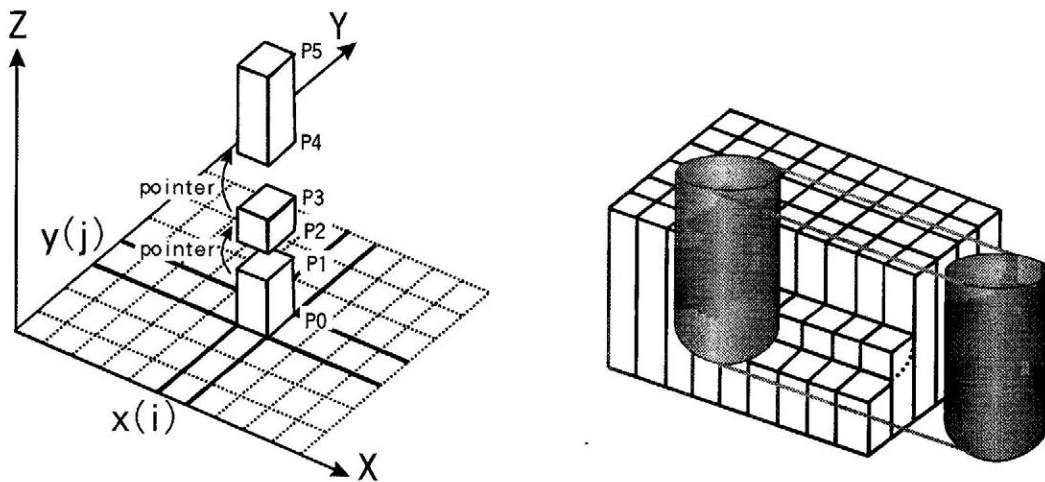


図6. 2 ソリッドモデルに基づく加工シミュレーション

この手法を用いると，加工後の形状が精度良く求められ，視点による精度のばらつきや視点変更による再計算は不要である反面，NCプログラムのブロック毎にソリッドモデルレベルでの曲面間の除去処理が必要となるため，NCプログラムのブロック数が増えると膨大な処理時間を要する。また，形状の描画に時間を要するためリアルタイムな表示ができないなどの問題点を有している。

これらの二つの方法は，前述のようにそれぞれ一長一短を有している。そこで，精度良くNC加工シミュレーションを行いながら高速に描画するために，これらの二つの手法を組み合わせたNC加工シミュレーション手法が現在利用されている。この手法は形状を離散化して表現することにより処理の高速化をはかる手法であり，形状モデルとしてVoxelデータを用いた手法は最も簡単なNC加工シミュレーションである^[105]。しかし，Voxel方式は精度を上げようとする膨大なメモリを必要とするため，一般にはデクセルを利用する手法が利用されている。この手法は図6. 3 (a)に示すように，拡張Z-MapのデクセルデータをXY平面上にZ方向に対して配置し，素材データから1ブロックの工具移動

により作成される工具の掃引形状を除去する手法である。3軸加工において切り込み方向がZ方向だけの場合は、図6.3(b)に示すように単純なZ-Mapデータ構造で処理でき、除去演算が高さ方向のZ値のみの更新で行えるため、演算を高速に行うことができる。この他にも、デクセルの点情報以外に加工後の表面の法線ベクトルを求め、描画の精度を向上させる手法なども開発されている^{[160][161][162]}。また、これらのNC加工シミュレーションシステムにおける形状除去処理は、切削により除去される除去体積の算出も高速に行えるため、切削中における工具の負荷演算にも利用できる^[163]。



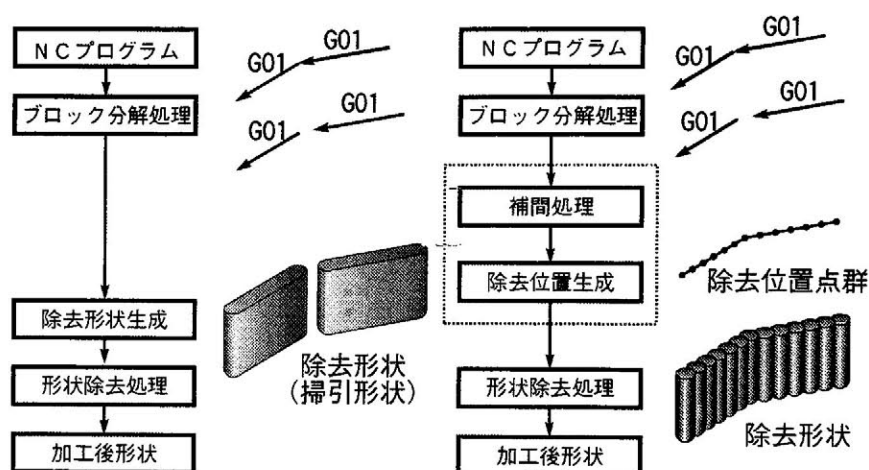
(a) X Y平面基準の拡張Z-Mapデータ (b) Z-Mapデータによる除去
図6.3 離散化データに基づく加工シミュレーション

現在のNC加工シミュレーションは、形状データに離散化したモデルを利用することにより、微小線分ブロック等の処理には時間を要するが、加工後の形状を表現するには十分な機能を有するようになってきている。今後は、さらに高速高精度化が進む加工技術において、CNC装置の運動誤差や、工具のたわみ、熱による変形等の物理現象を考慮した高精度なNC加工シミュレーションが必要となると考えられる。しかし、これらの現象を含めたNC加工シミュレーションを行おうとした場合、離散化した形状データでは十分な精度が得られない。このため、現状ではソリッドモデルを用いてNC加工シミュレーションを行っているが、工具の変形により生じる複雑な曲面を含んだ形状の論理演算が増えることにより、形状除去処理に膨大な時間時間を要するため、実用化を妨げる大きな要因となっている^{[150][164]}。

この問題を解決するため、NC加工シミュレータに用いる形状モデルとして、形状を精度良く離散化できるBoundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレータを開発すると共に、運動誤差や物理現象を再現できるNC加工シミュレーション手法の開発を行った。

6.3 NC加工シミュレーションの概念

一般的に、NC加工シミュレーションを行う際には、図6.4(a)に示すようにNCプログラムまたはCL (Cutter Location) データを基にブロック毎に工具移動によりできる掃引形状を、素材形状から除去する手法が用いられる。しかし、この手法ではブロックが増大した際には、処理時間を要する欠点が生じる。このため、図6.4(b)に示すように、Boundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレーションシステムでは、工具のたわみや熱変形に対応するため、ブロック毎ではなく各位置でこれらの演算ができるようにNCプログラムを離散化する手法を用いた。また、離散化の間隔は、基本的にNCプログラムの送り速度と、NCシステムが持つ補間周期により求めた。このとき、補間処理による補間時間当たりの移動量が形状の格子間隔を越えた場合は、格子間隔より小さくなるまで補間位置を細分化する。



(a) 従来の除去処理 (b) 補間位置による除去処理

図6.4 NC加工シミュレーションの除去処理

図6.5に、Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションシステムの基本構成図を示す。入力は、NCプログラム、素材形状(ワーク形状)、工具形状とCNC装置の補間周期を与える。NCプログラムは、補間処理によって補間時間当たりの位置データ点群に変換される。一方、素材形状と工具形状はBoundary-Map形状モデルに変換され、それぞれワークフレームと工具フレームに格納する。その後、補間時間当たりの各位置において毎回除去処理を行い、すべての点群データが無くなるまで除去処理を繰り返すことによって、Boundary-Map形状モデルによるNC加工シミュレーションを実現する。また、除去処理においては、補間時間当たりの除去体積を算出しファイルに保存する。

提案するBoundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションでは、工具フレームに定義する形状を替えることにより、任意形状の工具でのNC加工シミュレーションを実現できる。また、多軸加工で加工対象となるオーバハンクを持つ形状のNC加工シミュレーションにも対応できる。

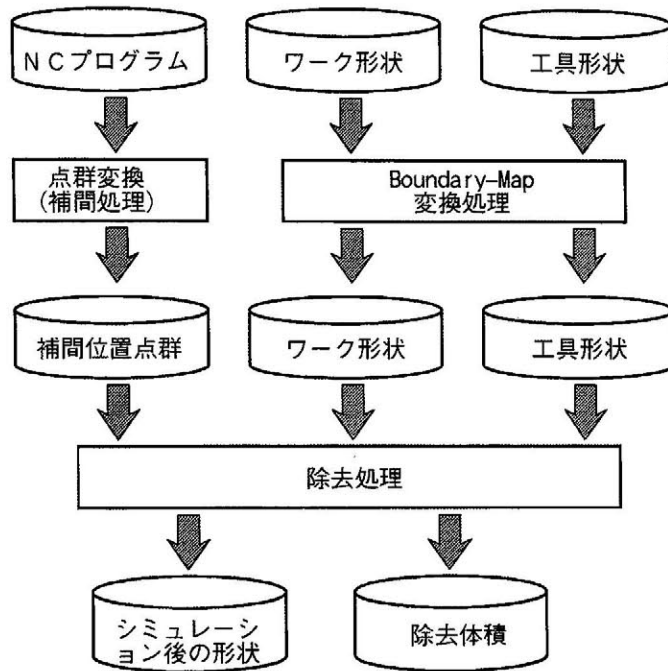


図6. 5 NC加工シミュレーションシステムの基本構成図

6. 3. 1 形状除去処理

Boundary-Map形状モデルは形状を定義した空間を必要な分解能で分割した格子線(スキャンライン)と形状の交差するふたつの点をスキャンライン毎にリスト構造で持つ手法である。NC加工シミュレーションにより加工後の形状を求めるには、指定された工具経路に基づき、ワークから工具によって除去される部分を求める必要がある。一般には、形状モデル内部の形状編集処理で用いられるセットオペレーションによる差分がとられており、Boundary-Map形状モデルにおいても同様にセットオペレーションにより除去処理を行う。

Boundary-Map形状モデルを用いてNC加工シミュレーションを行うには図6. 6 (a), (b) に示すように加工対象となるワークと工具を別々の空間、すなわちワークフレームと工具フレームに定義する。2次元の場合、それぞれの形状は図の矢印で示されたリストにより形状が表現されている。セットオペレーションを行う前に、工具フレームについては工具を表現しているリストを、図6. 6 (b) の破線で示す形状表面のリスト(工具端リスト)と、実線で示す形状内部のリストに分類する。そして、除去処理を行う場合には、図6. 6 (c) に示すように工具先端が補間時間当たりの位置にくるように、工具フレームを移動させる。ここで、工具先端位置は格子上的点である必要はなく、任意の位置に設定できる。そして、除去処理を行うには、ワークと工具フレームにおいてワークと工具の対応するリストについて図6. 6 (d) に示すセットオペレーション演算を行う。図6. 6 (d) のcase1に示すようなワークリストの中に工具リストがある場合は、工具フレームの部分を除いてワークリストを二つに分割する。また、case2のように一部分が重複している場合には重複部のみを削除する。case3のようにワークリストが工具リストに含ま

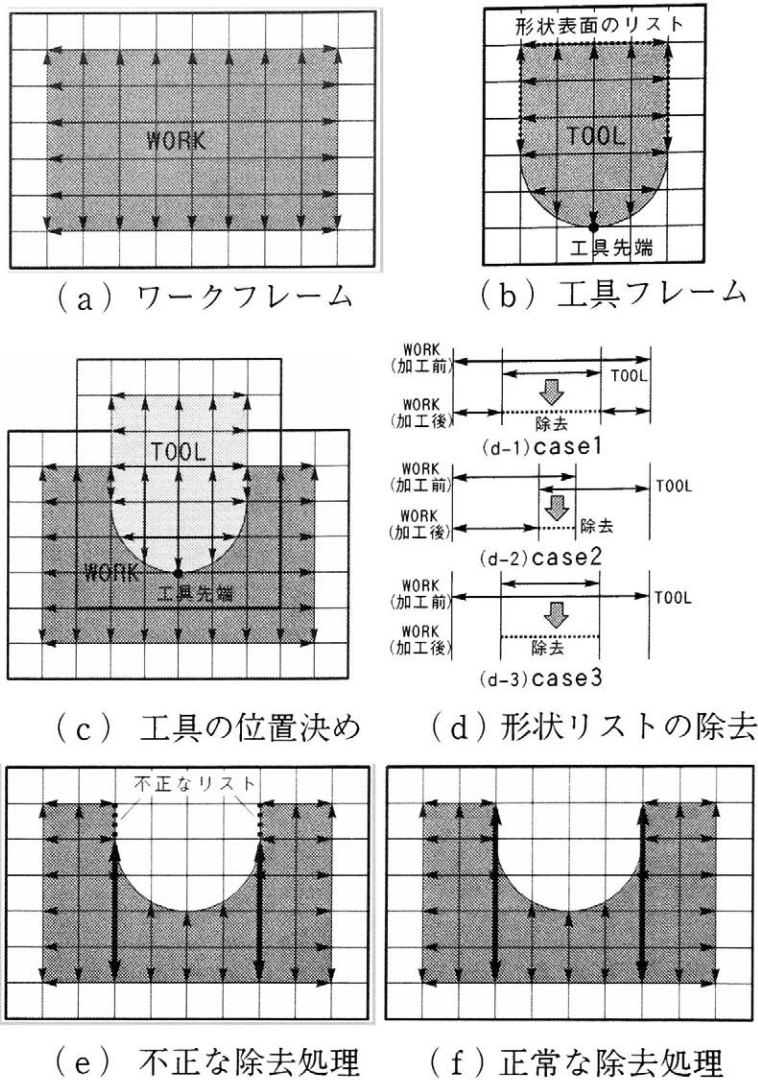


図 6. 6 加工前穴加工経路生成例

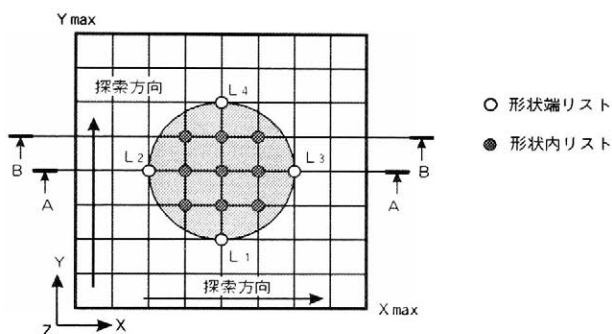
れている場合は、ワークリストすべてを削除する。

これらの除去処理は基本的にはワークのリストに対して、工具のリストと重複している部分を取り除く処理である。この処理をワークフレームと工具フレームの重複している部分にのみ行うことにより、高速に除去処理を行うことができる。しかし、単純にセットオペレーションを行うと、実際にはリストが存在しているため実線であるべき部分が、図 6. 6 (e) の破線に示すように削除され、不正なリストとなる場合がある。このような不正リストの生成を防ぐため、工具フレームにおいて事前に設定された形状表面である工具端リストにおいては前述の除去処理を行わないようにすることにより、図 6. 6 (f) に示すように正常な除去後の形状を生成することが可能となる。

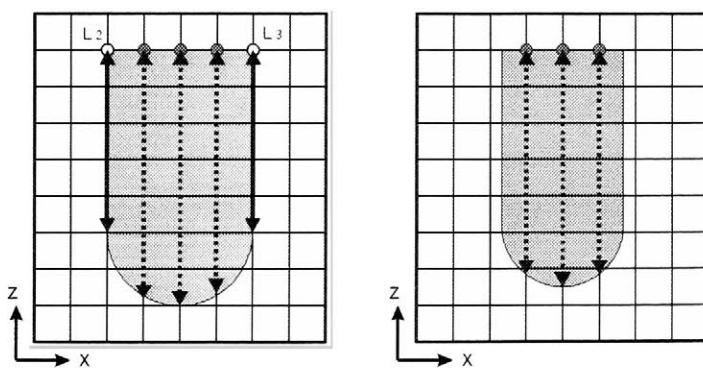
工具端リストを求めるためには、工具を構成するリストを順次スキャンし、リストの状態を調べていく。工具端を検出するアルゴリズムについて、図 6. 7 に示すボールエンドミルを例に説明する。図 6. 7 (a) に示す X Y 平面における Z 方向のリストについて調べる場合、スキャンの方向は X 方向と Y 方向となる。まず、原点から順に + X 方向に X max までスキャンし、スキャンが終わると Y を 1 増やし、X = 0 から X max までスキャンを繰り返す。そして、スキャンにおいては、形状のないリストから形状のあるリストになった

ときの形状リスト,形状があるリストから形状がないリストになったときの形状リストを探索する. 図6. 7 (b) に示すAA断面のスキャンでは, 形状リストL₂, L₃が探索される. 図6. 7 (c) に示すBB断面において形状リストが探索されるが, 形状リストのX方向リストの値が端点となっていないため, このリストは形状端リストと判断しない. XY平面におけるX方向の探索ではL₁, L₂, L₃, L₄が探索される. また, 同じXY平面内で原点から+Y方向に探索を開始した場合も, 同様に形状端の候補となる形状リストを探す. この場合は, X方向と同じL₁, L₂, L₃, L₄が探索される. このようにして得られた形状リストが, XY平面におけるZ方向の形状端を意味する形状リストとなる. 同様にこの処理をYZ平面においてはX方向の形状端リスト, ZX平面ではY方向の形状端リストを算出できる.

提案する手法によって, 形状端リストを探索した結果を図6. 8に示す. 図6. 8 (a) のボールエンドミルの場合に探索した形状端リストは (b) である. また, 図6. 8 (c) に示す形状の場合は, (d) に示すリストが形状端リストとなる.



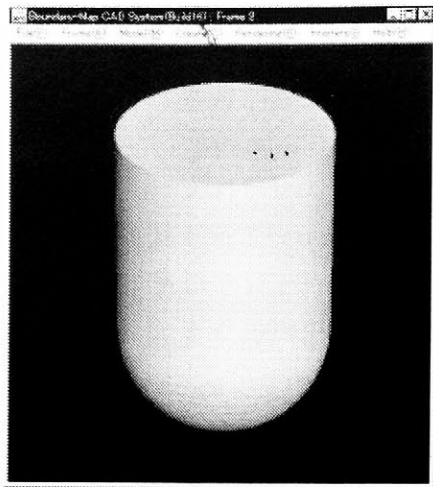
(a) Z軸方向リストの探索



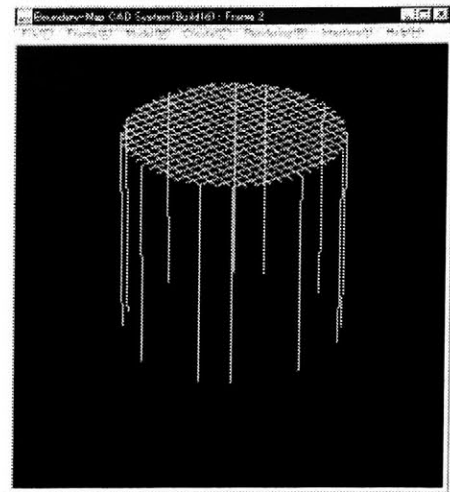
(b) AA断面

(c) BB断面

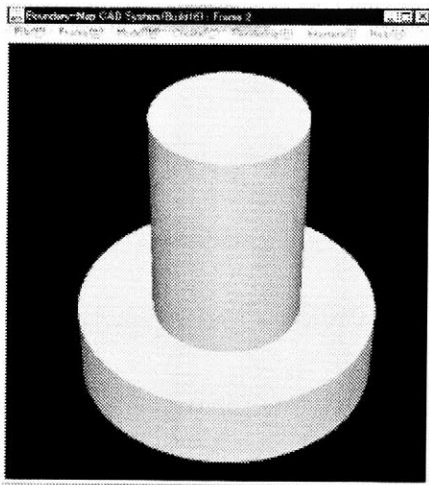
図6. 7 工具端リストの探索



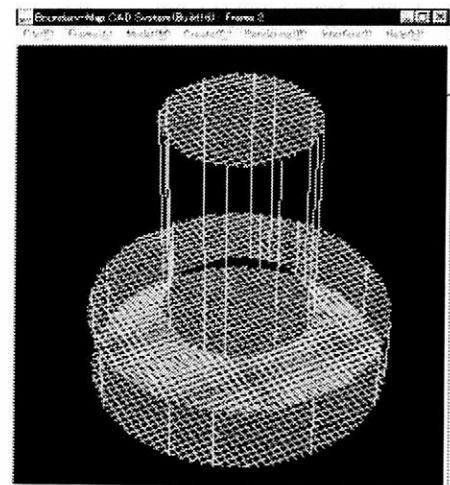
(a) ボールエンドミル



(b) ボールエンドミルの工具端リスト



(c) 任意形状の工具



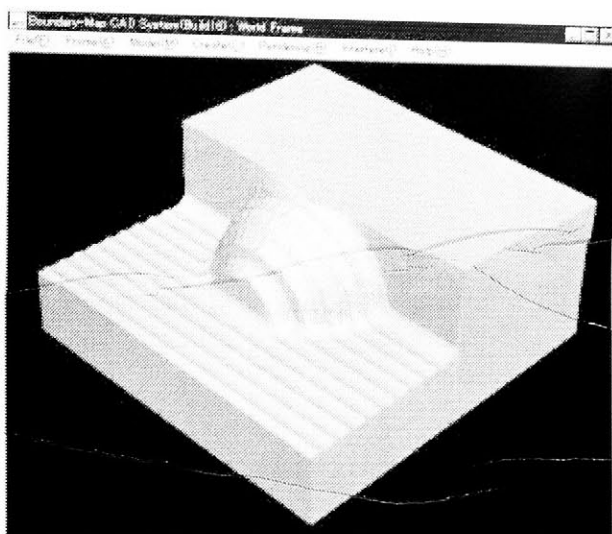
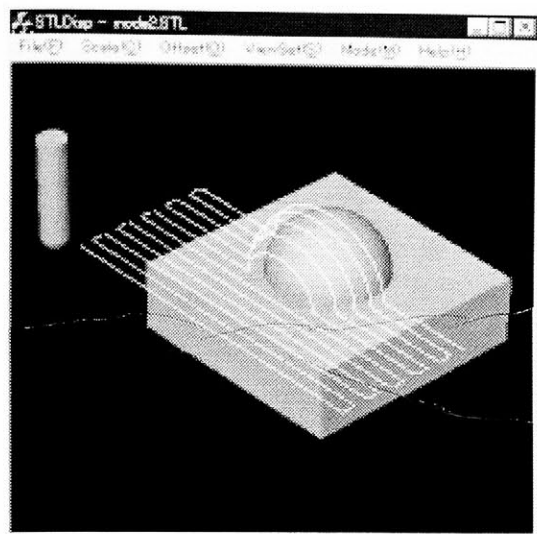
(d) 任意工具の工具端リスト

図6. 8 長手方向切削に基づく工具経路生成例

6. 3. 2 NC加工シミュレーションと除去量の算出

NCプログラムをCNC装置の補間周期に基づいて補間した点群位置データと、ワークフレームと工具フレームに設定された形状データより、提案する手法を用いてNC加工シミュレーションを行った結果について示す。図6. 9 (a)は工具形状であるボールエンドミルと半球を加工する工具経路を示している。図6. 9 (b)は直方体のワークに対してNC加工シミュレーションを行った結果である。工具経路が短いため、シミュレーションは数秒で終了する。

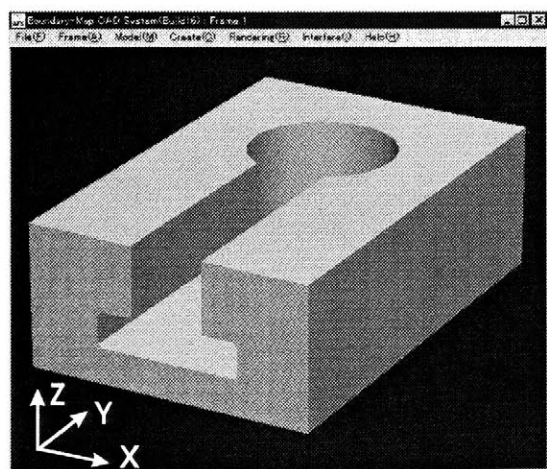
また、Boundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレータでは、用いる工具形状に制限がないため、加工後の形状にオーバハンクを持つ形状のNC加工シミュレーションを行った。工具には図6. 8 (c)で示した形状を用いた。工具経路はX方向に切り込んだ後に、+Zに移動した結果が図6. 10 (a)であり、-Yに移動した結果が(b)である。同図より、オーバハンク形状に対してもNC加工シミュレーションが実行できている



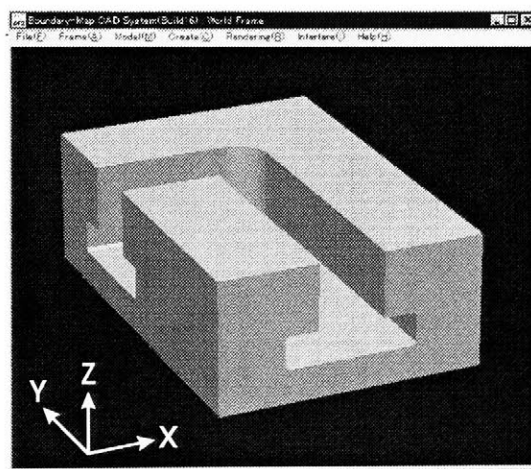
(a) 工具経路

(b) 加工シミュレーション後の形状

図 6. 9 加工シミュレーション例



(a) +X, +Z 移動



(b) +X, -Y 移動

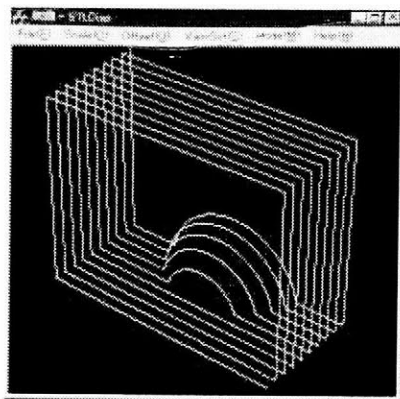
図 6. 10 オーバハング形状の加工シミュレーション例

ことがわかる。

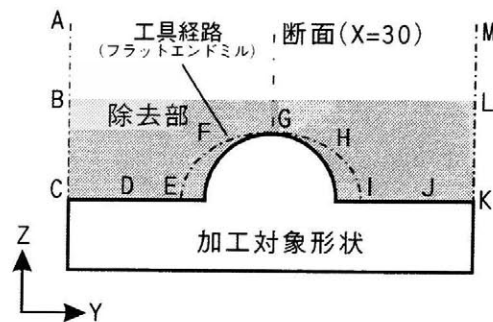
NC加工シミュレーションにおける形状除去処理において、除去体積を求めることは、除去体積が工具の単位時間当たりの工具負荷に換算できるため重要となる。離散化された形状モデルを用いた場合、デクセルの長さがそのまま単位長さ当たりの体積であるため、除去体積はデクセルを切りつめた長さとなり、簡単に求めることができる。現在のNC加工シミュレーションにおける除去体積計算は一般にこの手法が用いられている。Boundary-Map形状モデルでのNC加工シミュレーションにおいても、形状リストをデクセルとして扱うことにより、切りつめた量を除去体積とすることができる。しかし、Boundary-Map形

状モデルでは形状データをX, Y, Zの各方向に持っているため, 除去体積は各軸の切りつめたリストの長さ(デクセルの体積)を求めた後の値を3で割った値となる。

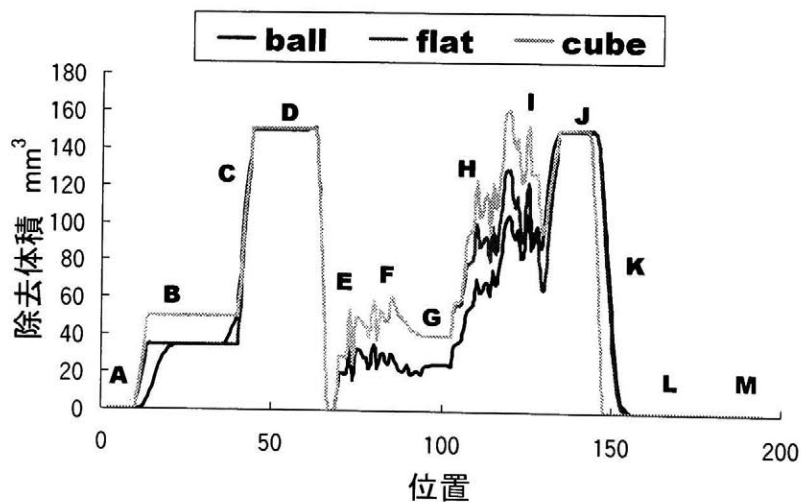
図6. 11 (a) に示す工具経路について, X=30における加工断面(図6. 11 (b))での工具経路に基づいて除去体積を求めた結果を図6. 11 (c) に示す. 工具は, ボールエンドミル, フラットエンドミル, そして参考として直方体の形状の場合についてシミュレーションを行い, 除去体積を求めた. 削りだしの箇所BやC, I, Jの箇所では除去体積が増加していることがわかる。



(a) 工具経路



(b) 断面



(c) 算出した除去体積

図6. 11 除去体積の算出

6. 4 NC加工シミュレーション結果と評価

6. 4. 1 NC加工シミュレーション結果

提案するBoundary-Map形状モデルに基づいてNC加工シミュレーションが実現できるかを確認するため、実際に加工現場で用いられた工具経路を利用してNC加工シミュレーションを行った。また、同時にNC加工シミュレーションに要する時間を測定した。工具経路はすべて、微小線分ブロックから構成されている。

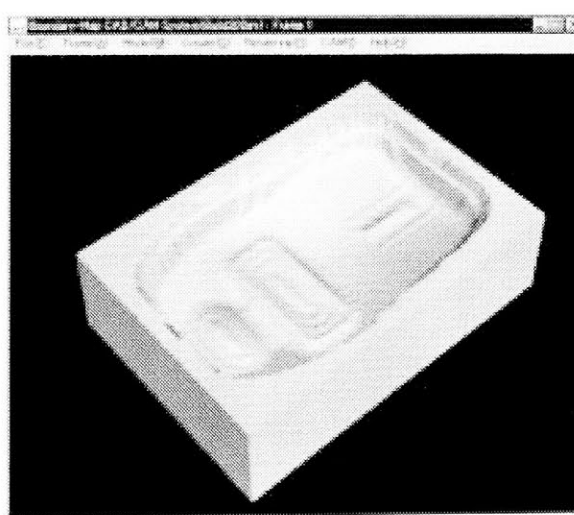
図6.12(a)は、PHSケースの荒加工用工具経路であり、(b)はNC加工シミュレーションを行った後の形状である。素材は縦×横×高さをそれぞれ75mm×110mm×30mmの直方体としており、工具は半径5mmのボールエンドミルを用いている。また、格子間隔は1mmとしてNC加工シミュレーションを行った。図6.13(a)は、PHSケースの中仕上げ工具経路であり、(b)はNC加工シミュレーション後の形状を示している。図6.14(a)は、PHSケースの仕上げ加工用工具経路であり、(b)はNC加工シミュレーション後の形状を表示した図である。

補間周期を10msとしてNC加工シミュレーションを行った結果、各工具経路の点の数は、76497点、284474点、4858349点であり、処理時間は5分52秒、10分18秒、2時間34分27秒であった。それぞれの工具経路での1点当たりの処理時間は、4.6ms/点、2.17ms/点、1.91ms/点であった。ただし、この処理時間は離散化された工具位置の移動長さを制限せずに測定した結果である。工具の移動長さを最小0.01mmに制限すると、NC加工シミュレーションの処理時間は約1/10程度に短縮される。

図6.15(a)は、エンジンの排気ダクトの形状を加工する工具経路で、(b)はNC加工シミュレーション後の形状を示している。

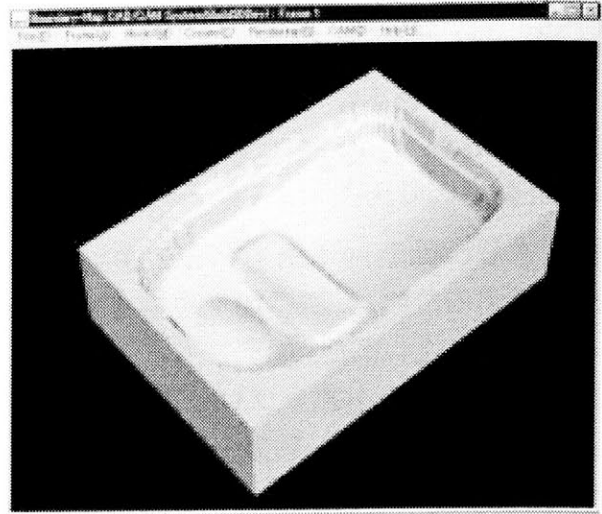


(a) 工具経路



(b) 加工シミュレーション後の形状

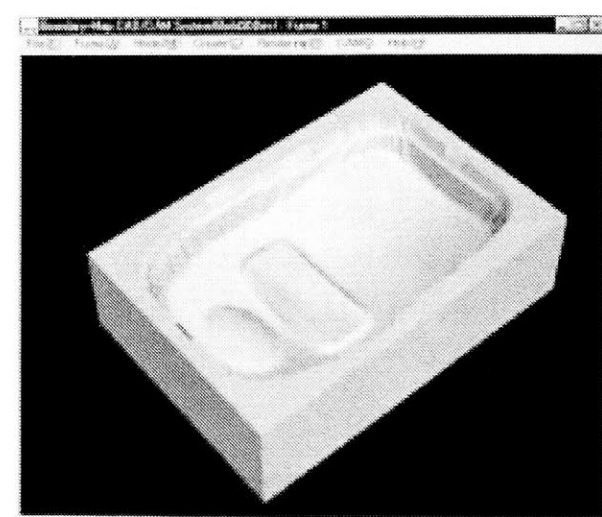
図6.12 荒加工用工具経路の加工シミュレーション結果



(a) 工具経路

(b) 加工シミュレーション後の形状

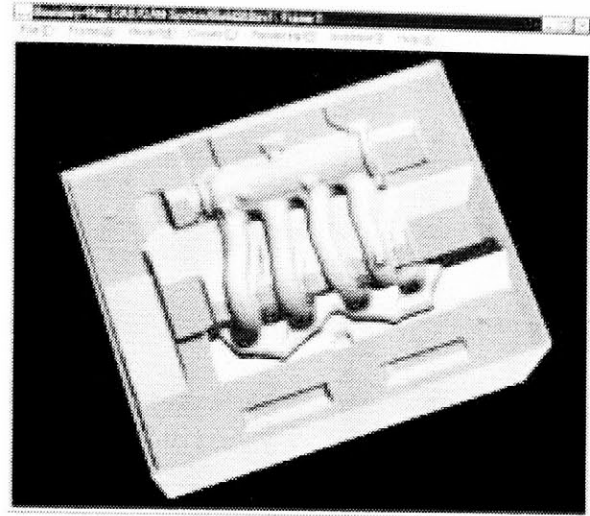
図6. 13 中仕上げ加工用工具経路の加工シミュレーション結果



(a) 工具経路

(b) 加工シミュレーション後の形状

図6. 14 仕上げ加工用工具経路の加工シミュレーション結果



(a) 工具経路

(b) 加工シミュレーション後の形状

図6. 15 加工シミュレーションの結果

6. 4. 2 NC加工シミュレーションの比較

開発したBoundary-Map方式によるNC加工シミュレーションの性能を評価するため、汎用のNC加工シミュレータと処理速度と精度について比較を行った。比較対象としたNC加工シミュレータは、国内でシェアの高い米国GCtech社製のVERICUTである。VERICUTは図6. 1に示したCG技術をベースにしており、NC加工シミュレーションを高速に描画しながら行うことができる。市販されているNC加工シミュレータの中では精度と処理速度で定評がある。

比較は、NC加工シミュレーション後の形状精度、NC加工シミュレーションに要する処理時間、干渉チェックの精度について行った。VERICUTは最新バージョンであるバージョン4.4を用いてEWS (HP Visualize B132L+)上で実行した。また、Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションは、パソコン上で実行した。比較に用いたEWSとパソコンの仕様を表6. 1に示す。

表6. 1 比較に用いたコンピュータの仕様

	VERICUT	B-Map
CPU	PA-RISC	Pentium II
クロック (MHz)	132	450
搭載メモリ (Mbyte)	128	256
OS	HP-UNIX	WindowsNT

(1) NC加工シミュレーション後の形状精度

NC加工シミュレーション後の形状精度を比較するため、図6. 16に示す直方体(縦20、横20、高さ30mm)をボールエンドミル(半径5mm、工具長さ25mm)で加工し

た後の形状の精度を比較した. VERICUTの精度測定には, 検査メニューの測定機能を用いた. この機能は, 始点と進行方向を与えることにより直線を定義し, この直線と形状表面との交点を求める機能である. この測定機能を用いて, 図6. 17 (a)に示すように直線をXY平面から-Z方向に降ろし, 加工後の形状との交点を求めると共に, ZX平面から-Y方向に降ろし加工後の形状との交点を求めた. 交点を求める直線の数, それぞれ

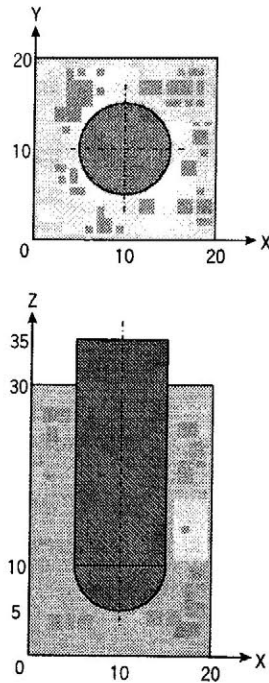
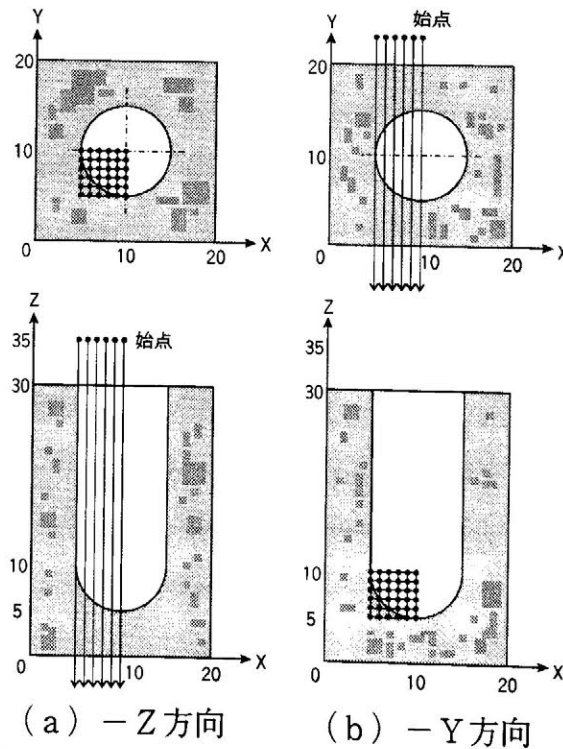


図6. 16 精度比較のための除去形状



(a) -Z方向 (b) -Y方向
図6. 17 精度比較のための走査線

36本である。

表6.2(a), (b)に測定した交点座標の一部の座標値を示す。測定した結果より、加工後の形状は標準でサブミクロンまで正確に計算されていることがわかる。VERICUTにおいては画面に占める素材の大きさが精度に影響するため、画面サイズに占める素材の大きさをさまざまに変えて測定したが、結果は同じであった。また、VERICUTにはNC加工シミュレーション精度を解像度によって設定でき、超、高、中、標準解像度の順に精度が低下する。解像度も変えて測定を行ったが、結果は同じであった。

一方、Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションの性能を同様に測定を行った。その結果は、表6.2に示すVERICUTとまったく同じ値であった。ここで、NC加工シミュレーションに用いたBoundary-Map形状モデルの定義空間における格子間隔は1mmとしている。

表6.2(a) Z方向の精度

始点座標			ベクトル			交点座標	
x	y	z	x	y	z	z1	z2
5	5	35	0	0	-1	30.0000	0.0000
6	7					30.0000	0.0000
7	7					7.3542	0.0000
7	8					6.5359	0.0000
8	8					5.8769	0.0000
8	9					5.5279	0.0000
9	6					7.1716	0.0000
9	10					5.1010	0.0000
10	6					7.0000	0.0000
10	10					5.0000	0.0000

表6.2(b) Y方向の精度

始点座標			ベクトル			交点座標	
x	y	z	x	y	z	y1	y2
5	25	5	0	-1	0	20.0000	0.0000
6		7				20.0000	0.0000
7		7				20.0000	12.6458
7		8				20.0000	13.4641
8		8				20.0000	14.1231
8		9				20.0000	14.4721
9		6				20.0000	12.8284
9		10				20.0000	14.8990
10		6				20.0000	13.0000
10		10				20.0000	15.0000

これらの結果より、NC加工シミュレーション後の形状の精度はVERICUTとBoundary-Map形状モデルと差が無く、精度良く表現されていることが明らかになった。

(2) NC加工シミュレーションに要する処理時間

NC加工シミュレーションにおいて、高速にNC加工シミュレーションを行うことは、作成したNCプログラムの検証時間を短縮できるため、加工時間全体の高速化に効果があ

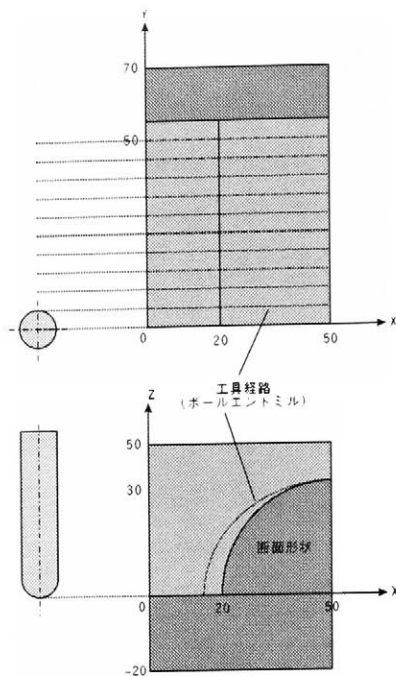
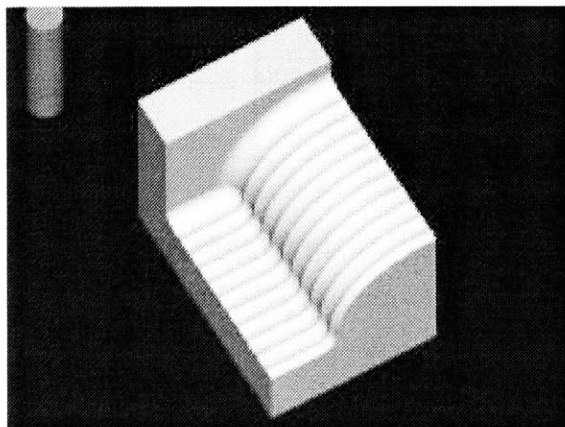


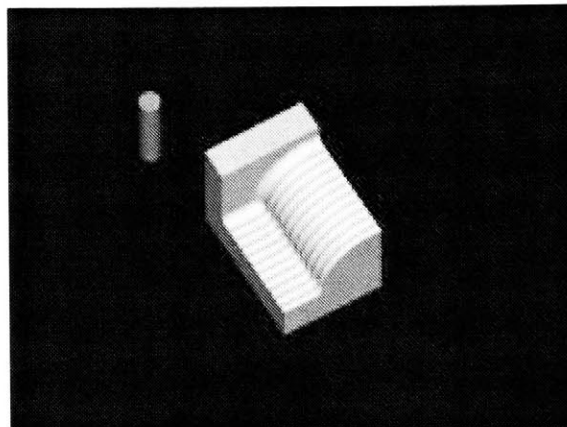
図6. 18 処理時間測定用工具経路

る。そこで、VERICUTとBoundary-Map形状モデルについて、NC加工シミュレーションに要する時間の測定を行った。測定の対象とする加工形状と工具経路を図6. 18に示す。加工対象形状は、半径30mmの円柱を倒した形状で、工具は半径5mmのボールエンドミルとする。工具経路は円柱の上半分を加工するNCプログラムであり、円弧部の加工における微小線分長さを2, 1, 0.5, 0.25, 0.2, 0.1mmに変えることにより、ブロック数を増やした場合の処理時間の変化を測定した。VERICUTは、画面全体に占める素材形状の大きさにより処理時間が異なるため、VERICUTが素材の大きさを自動的に設定するデフォルト設定（標準画面）と、デフォルト画面での素材より小さくした場合（小画面）の二つの場合について測定した。

図6. 19 (a) に標準画面でNC加工シミュレーションした結果を、図6. 19 (b)



(a) 標準画面



(b) 小画面

図6. 19 VERICUTの画面サイズ設定とNC加工シミュレーション結果

に小画面でNC加工シミュレーションした結果を示す。また、VERICUTは画面の解像度により変化するため、最も解像度が高い超高解像度と最も低い標準解像度について測定した。一方、Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションは、サーボデータの点数により処理時間が異なるため、補間周期を5、10msにした場合について測定した。図6.20は、Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーション後の形状を示している。

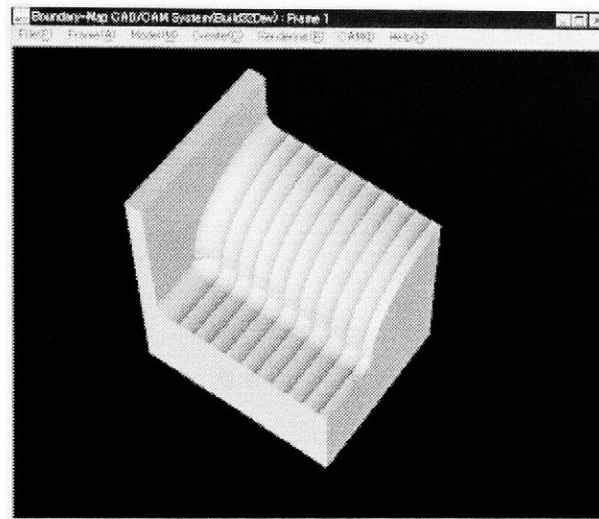


図6.20 Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーション結果

図6.21は、NC加工シミュレーションにおける処理時間を測定した結果を示している。同図より、VERICUTは超高解像度で実行した場合に、ブロック数の増加により著しく処理時間が増加していることがわかる。このことは、1ブロックが1mm以下になる曲面加工などブロック数が多い加工プログラムに対して、VERICUTでNC加工シミュレーションを行った場合に、多くの処理時間が必要になることを示している。

図6.22は、VERICUTの標準解像度でNC加工シミュレーションを行った結果と、

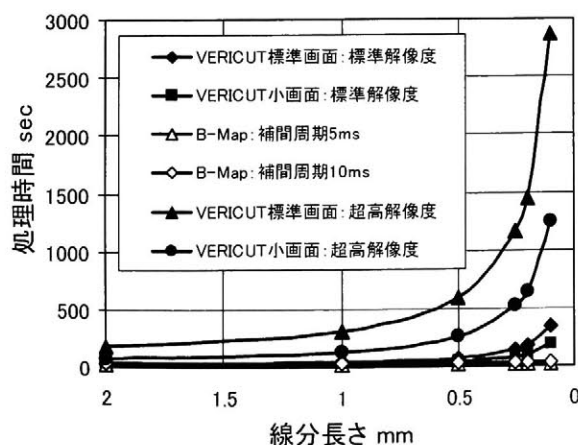


図6.21 処理時間測定結果

Boundary-Map 形状モデルによる結果を示した図である。同図より、ブロック数の増加に伴ってVERICUTは処理時間が増大しているのに対して、Boundary-Map形状モデルは、処理時間がブロック数に関係なく一定であり、補間周期によって処理時間が増減することが明らかになった。

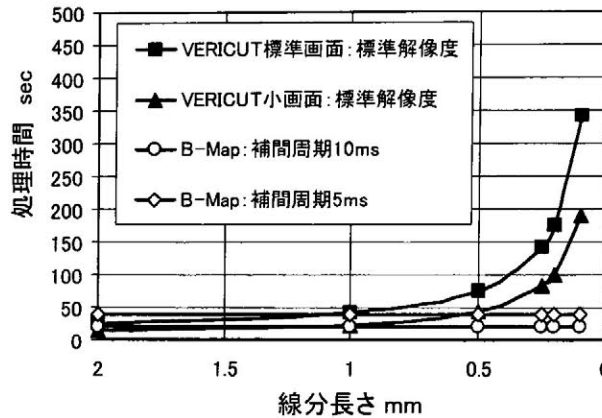


図 6. 2 2 処理時間の比較

(3) 干渉チェックの精度

VERICUTにおける解像度は、NC加工シミュレーション後の形状精度には影響を与えない一方で、処理時間を増大させている。そこで、VERICUTにおいて解像度が影響されると考えられる干渉チェックの精度について測定を行った。VERICUTには、早送り移動中に形状を除去する状態が発生した場合に警告を発し、干渉していることを示す機能があるため、干渉量を変化させて警告が発せられる干渉量を求めた。

具体的には、図 6. 2 3 に示す形状と工具経路を用いてNC加工シミュレーションを行い、図 6. 2 4 に示すNCプログラムのN5ブロック移動終了点を干渉させる位置にした場合に、VERICUTが干渉の警告を出す干渉量を求めた。図 6. 2 4 に示すN5ブロックの下線部の値が10.0である場合には干渉せず工具と素材は接するが、10.0を越える場合には干渉が生じる。VERICUTでは画面サイズにおける素材の大きさと解像度によって干渉チェックの精度が変わるため、画面サイズはVERICUTのデフォルトに設定し、解像度を超高解像度と、標準解像度で行った。

その結果、標準解像度では干渉量が0 mmから0.039mmの間では干渉しているにもかかわらず、干渉していると判断されなかった。また、超高解像度では0.015mmまでは干渉と判断されなかった。

一方、Boundary-Map方式に基づくNC加工シミュレーションでは、形状を定義している格子間隔によって精度が変わるが、形状精度を測定した場合と同じように格子間隔1mmで干渉チェックを行った。その結果、Boundary-Map形状モデルでの干渉チェックでは、干渉量が0.001であっても正確に干渉と判断された。

以上の結果より、VERICUTは高速に加工中の状態をコンピュータグラフィックス表示できる一方で、干渉チェックにおける精度は低く、またその精度は画面サイズや解像度に左右されることが明らかになった。

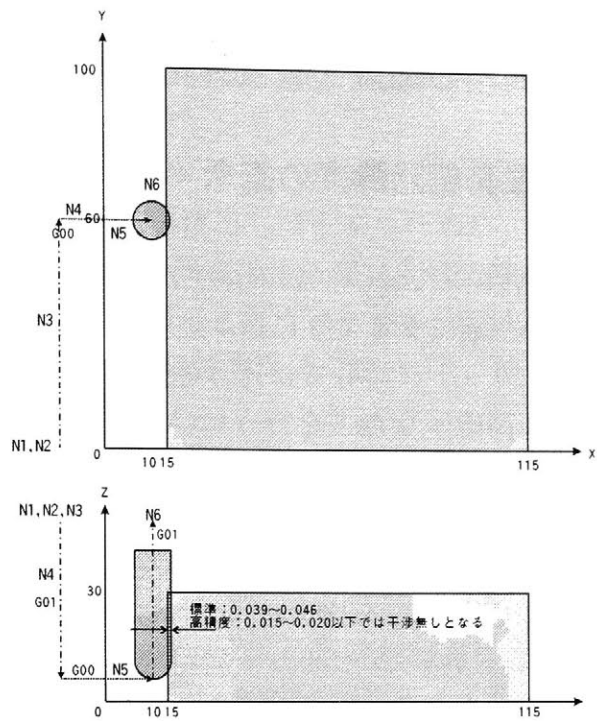


図 6. 2 3 干渉精度比較用の形状

```

N1 G90G01F2000S300
N2 G01X0.Y0.Z30.F1000
N3 G01Y60.F1000
N4 G01Z5.F1000
N5 G00X10.039
N6 G01Z50.
N7 M02

```

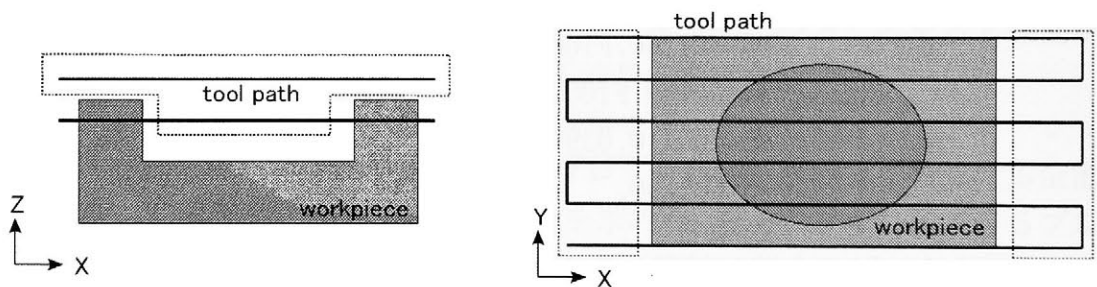
図 6. 2 4 比較用NCプログラム

6. 5 エアカット工具経路の除去

6. 5. 1 エアカット工具経路除去の概念

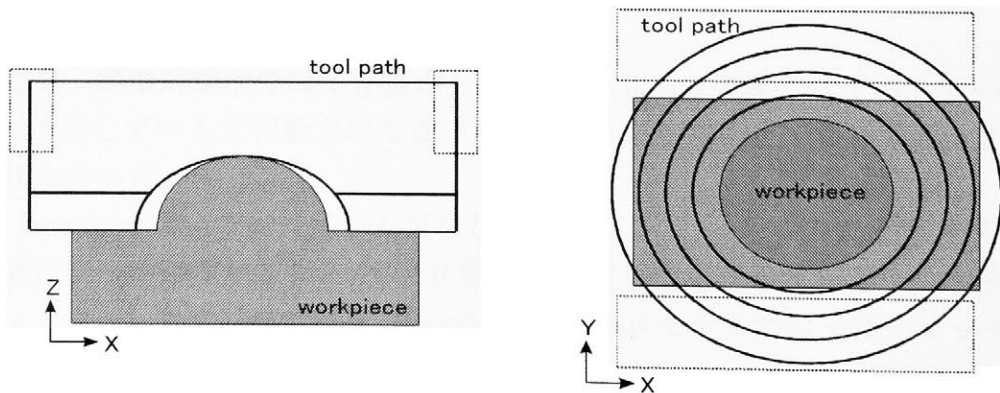
近年のNC加工シミュレーションでは、形状の除去だけでなく加工中の除去量を算出し、単位時間当たりの除去量が一定になるように送り速度を変更する最適化の機能が開発されてきている。しかし、エアカットに対しては送り速度を上げるか、インタラクティブに編集する機能しか持たない。高能率な加工を行うには、エアカット経路や無駄な早送り経路の検出とエアカット工具経路の除去や編集が加工能率の向上における有効な手段となる。

そこで、本研究ではBoundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションを用いて、エアカットなどの無駄な工具経路を検出し、これらの工具経路を自動的に編集し、工具経路を最短化する手法を提案する。エアカット経路除去の対象となるのは図6.25に示す各工具経路である。図6.25(a)においては、凹部の中を切削する工具経路は切削送りであるが、切削しないため早送りにすべき箇所である。また、(b)はワークの両端の部分は切削しないので無駄な動きであり、(c)はZ方向の高さに加工形状より高くまで逃げており無駄となる。(d)は等高線オフセット経路でワークからはみ出ている箇所は無駄な動きとなる。これらの箇所に関して工具経路の最短化を試みた。



(a) 凹部の工具経路

(b) 走査線による両端の工具経路



(c) 走査線による逃げ経路

(d) 等高線オフセットのはみ出し経路

図6.25 最短化対象の工具経路

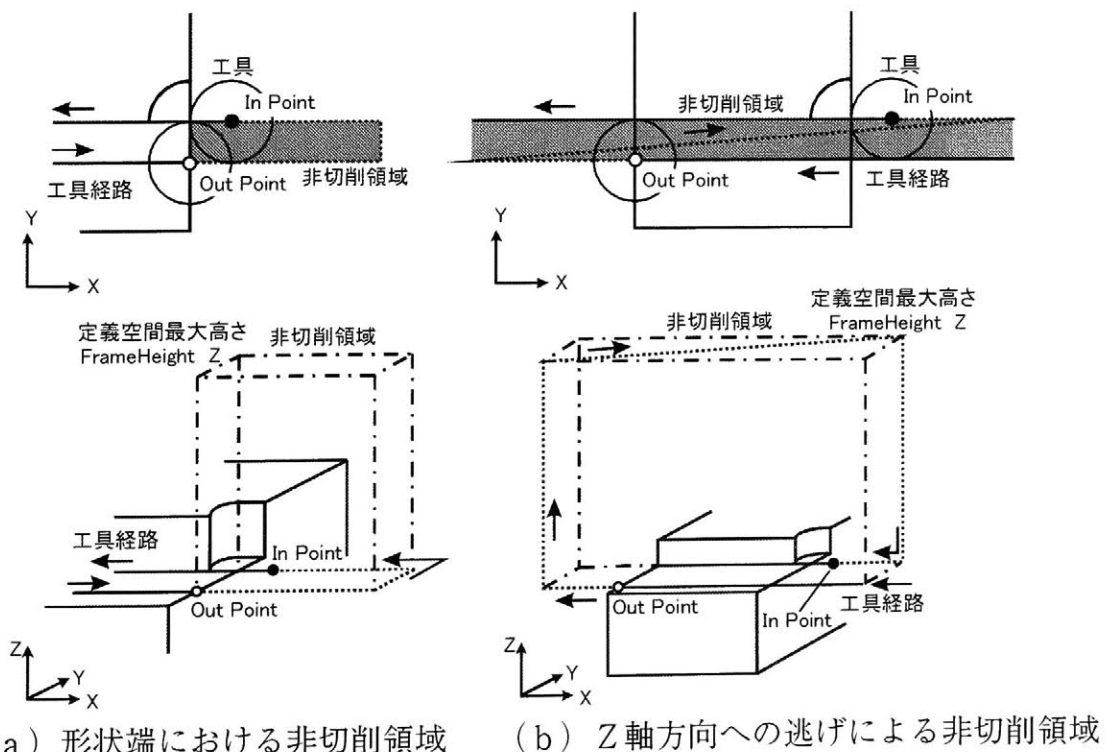
6. 5. 2 エアカット工具経路除去アルゴリズム

NC加工シミュレーションにおいて、エアカット部は切削量の有無により判断が可能である。そこで、エアカット領域を検出し修正するために、次の二つの手順で行う。ひとつは、NC加工シミュレーションの形状除去処理における除去量の有無により工具経路を切削・非切削領域に分ける処理である。もうひとつは、検出された非切削領域に対して無駄な工具経路を削除する工具経路の編集処理である。

(1) 非切削領域の探索

Boundary-Map形状モデルにおける形状除去は、ブロック毎のスイープ形状に基づく除去処理ではなく、CNC装置における補間周期毎の位置での除去処理であるため、その単位は補間周期毎の除去量、すなわち補間時間当たりの除去量となる。この除去量が無い位置は非切削領域であり、除去量が存在する位置は切削領域となる。これにより、工具経路のブロック移動途中での除去状態と位置を知ることができる。非切削領域の検出は、除去量が存在している状態から無くなる状態、すなわち切削から非切削に移る点(アウトポイント)を記録し、続けて、除去量が無い状態からある状態、すなわち非切削から切削状態に移る点(インポイント)の二つを記録する事により得ることができる。このアウトポイントからインポイントの間の経路が非切削経路であり、これらを含む3次元領域を非切削領域とする。この領域においてアウトポイントとインポイントを結ぶ最短な経路を生成することにより、効率の良い工具経路を生成することが可能となる。

図6.26は、これらの非切削領域の例を示している。図6.26(a)は走査線往復



(a) 形状端における非切削領域

(b) Z軸方向への逃げによる非切削領域

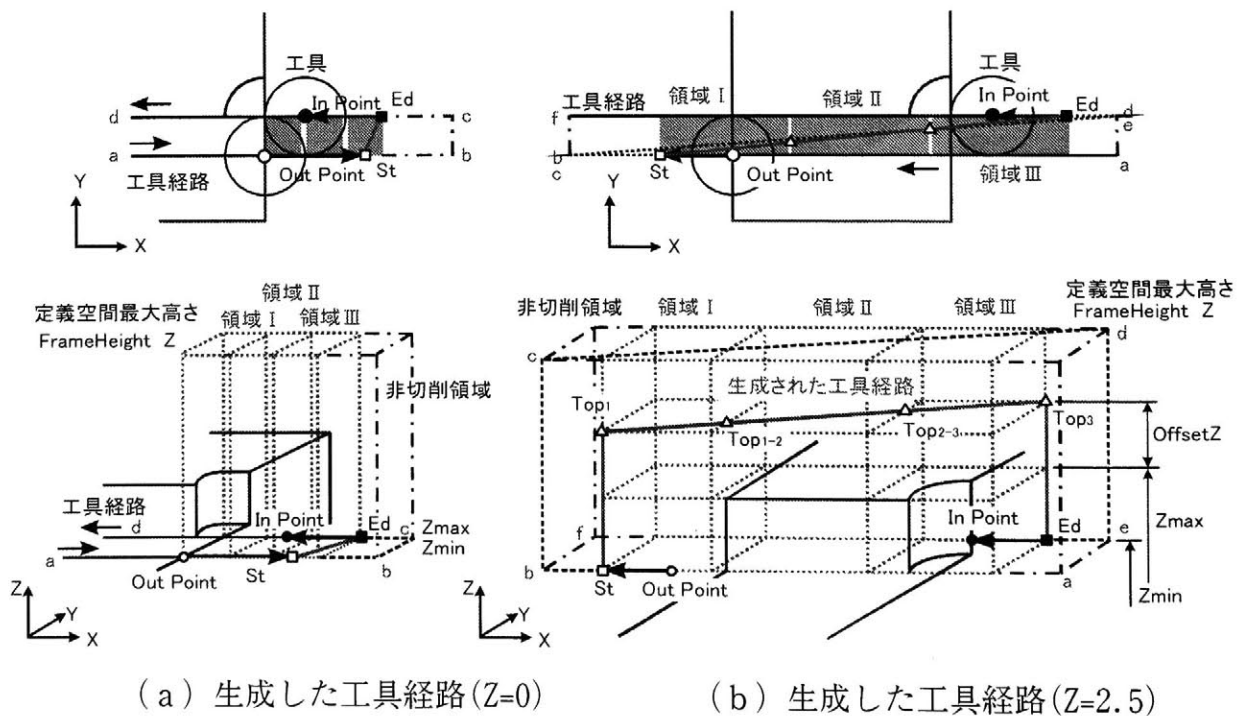
図6.26 非切削領域の検出

加工時の逃げとピックフィード移動を示しており、(b)は一方向加工時の工具のZ軸方向への逃げを示している。それぞれ破線で示している経路が非切削経路であり、これらを含む3次元の空間が一点鎖線で示される非切削領域となる。なお、非切削領域のZの値はBoundary-Map形状モデルで形状を定義している定義空間のZ軸の最大高さ(Frame Height Z)とする。

(2) 非切削領域の工具経路編集

NC加工シミュレーションにおける除去量の有無より取り出された非切削領域に対し工具経路を生成する方法として、最も簡単な方法は、アウトポイントとインポイントを直線で結ぶ方法であるが、一般にこの間には加工形状が存在しており、実用的ではない。また、新たに工具経路を生成する際、アウトポイントやインポイントにおいて工具の急激な進行方向の変化は工具破損につながるため、進行方向に対して安全な長さだけ前後に移動させる。

図6.27は図6.26(a)に示した非切削領域について工具経路を生成する例を示している。アウトポイントはアウトポイントを始点としてStまで、インポイントはインポイントを終点としてEdからそれぞれ進行方向に対する急激な除去量の変化を防ぐためにアプローチとリトラクトの経路を作成する。さらに、この非切削領域を図6.27に示すようにX、Y方向に対して領域I、II、IIIに3等分し、それぞれの領域における形状の最大高さ(Zmax)を求める。図6.27(a)の場合はZmaxとZminが同じ高さであるので、StとEdを結ぶ早送りを挿入する。これによって、a→b→c→dを通っていた工具経路は、a→St→Ed→dとなり、無駄な工具経路は削除される。一方、図6.27(b)のように、Z方向高さがZminと同じでない場合には、Z方向の最大高さ(Zmax)を求め、領域を3等分する。そして、StからZmaxに対して安全を見込んだ高さ



(a) 生成した工具経路(Z=0)

(b) 生成した工具経路(Z=2.5)

図6.27 非切削領域に対し生成した工具経路

OffsetZを付加した点列 T op1, T op1-2, T op2-3, T op3を通る早送りの工具経路を生成する。図6. 27 (b) の場合は全て同じ高さ(Z max)であるため, 同じ高さ(Z max+OffsetZ)を通る早送りとなる。これによって, a→b→c→d→e→fであった工具経路はa→S t→T op1→T op3→E d→fとなり無駄な工具経路を削除できる。また, 早送り移動量の長さが十分取れない場合は, 切削送りとする。

6. 5. 3 エアカット工具経路の除去結果

提案する手法を用いて, 簡単な形状の加工についてエアカットの除去を行い, 工具経路を発生させた。対象とする工具経路は, 図6. 28に示す直方体と球からなる形状を加工するための工具経路である。工具は半径10mmのボールエンドミルとし, 工具経路はZ方向に10mm刻みに5段階に分けて行う。ワークは高さ70, 幅100×80mmで, 工具経路の対象としている領域より小さい直方体形状を与えた。図6. 29 (a) は, 加工対象と工具経路を示している。図6. 29 (b) と (c) は, この工具経路に基づいてNC加工シミュレーションを行い, 与えられた工具経路を切削経路と非切削経路に分けた結果を示してい

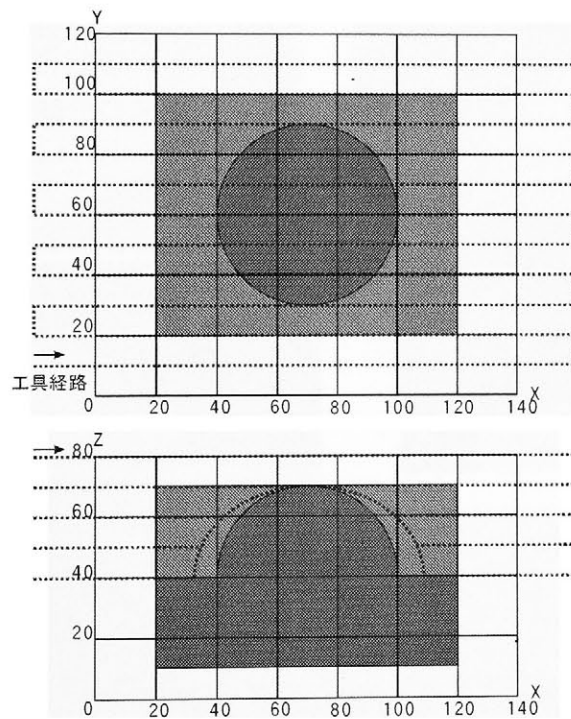
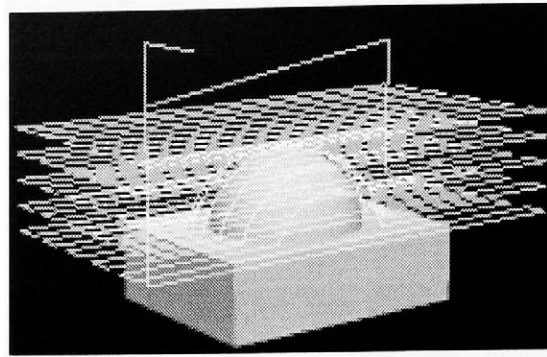


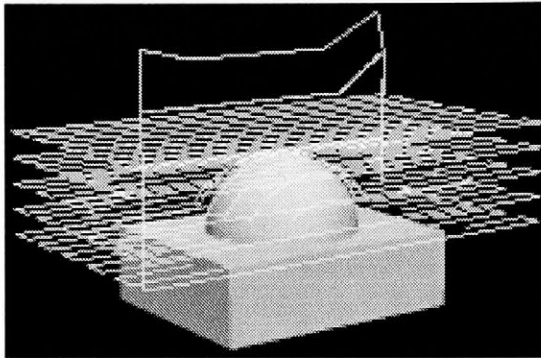
図6. 28 対象工具経路

る。この時, 非接触領域の長さは, 約9674mmであった。

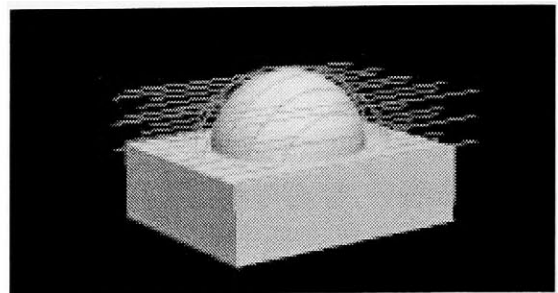
図6. 30は, 求められた非切削経路から, 提案する手法を用いて工具経路と切削経路を発生させた例である。見やすくするため, それぞれ, 高さ60, 50, 40mmに分けて表示している。この図より, 切削を行わない高さZ=80, 70mmの工具経路が全て削除されると共に, ピックフィード部分が短縮され, Z=50, 40mmにおいては切削済みの球に対して早送りで移動し, エアカット領域が除去されている事がわかる。エアカット除去により, 図6.



(a) 対象工具経路

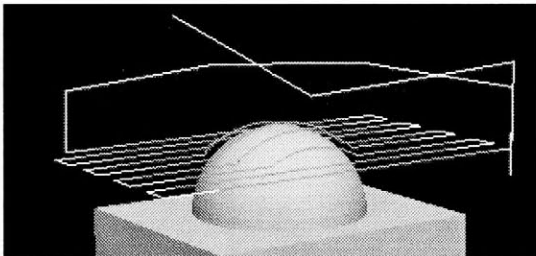


(b) 非切削領域

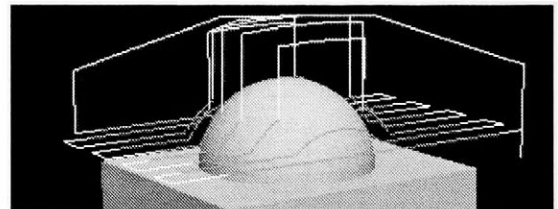


(c) 切削領域

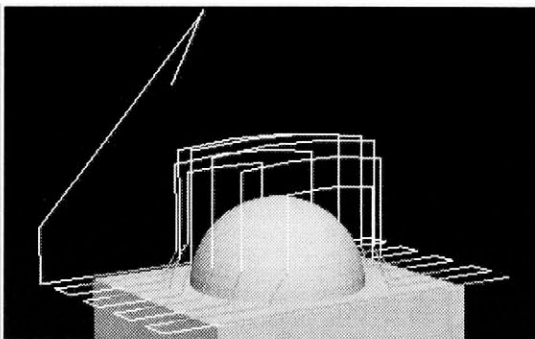
図6.29 非切削領域と切削領域の分離



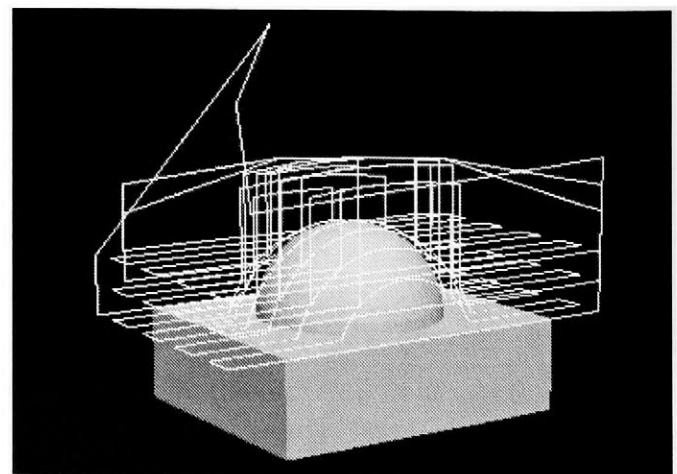
(a) $Z = 60 \text{ mm}$



(b) $Z = 50 \text{ mm}$



(c) $Z = 40 \text{ mm}$



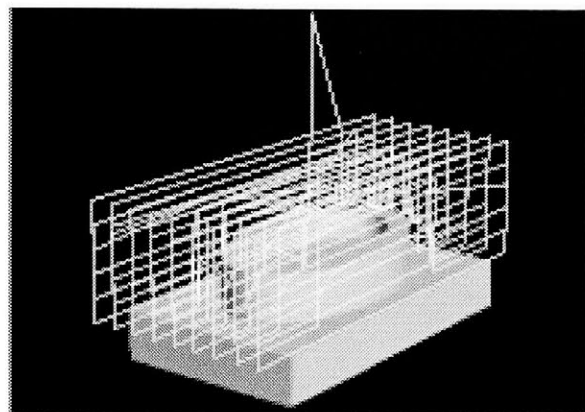
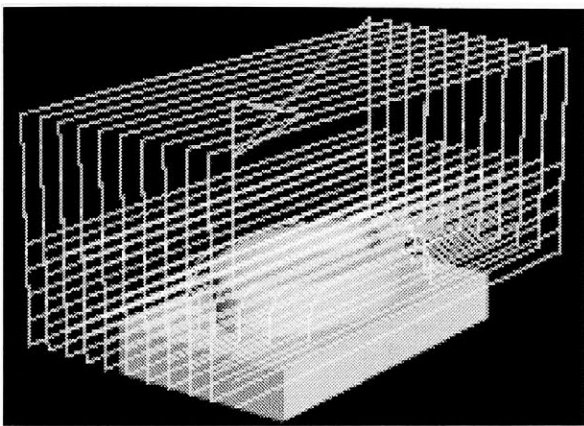
(d) エアカット除去後の工具経路

図6.30 エアカット除去処理結果

29 (a) の工具経路は、図 6. 30 (d) のように短縮される。このケーススタディにおいて、非接触領域のエアカット除去処理後の工具経路は、9674mm から 3154mm となり、工具経路は約 30% に減少されている。この内、約半分の 1875mm が早送り経路である。

また、図 6. 31 は、中央に凹を持つ形状を加工する工具経路に対してエアカットの除去を行った結果である。図 6. 31 (a) が除去する前の工具経路で (b) が除去後の工具経路である。Z 方向の高さが低くなると共に、不要な上面の加工の工具経路が削除されている。図 6. 32 は等高線工具経路に対してエアカット除去処理を行った例である。図 6. 32 (a) が除去する前の工具経路であり、(b) が除去処理後の工具経路である。同図よりワークからはみ出ている領域の工具経路が削除されていることがわかる。

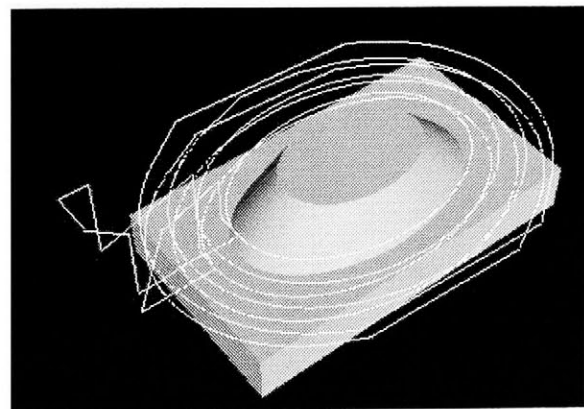
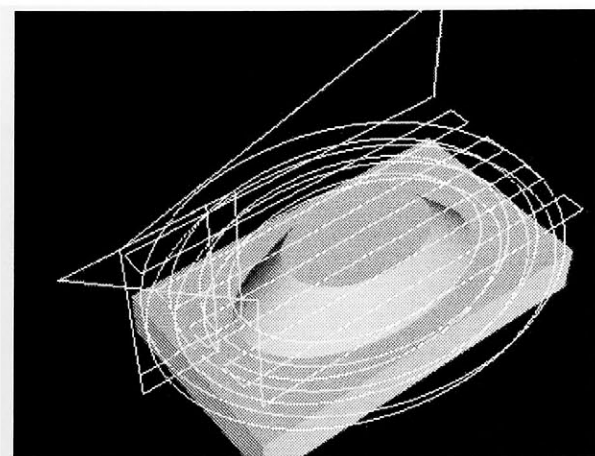
これらの結果より、提案する手法を用いることにより、エアカットを含む無駄な工具経路を除去し、効率の良い工具経路を生成できることが明らかになった。



(a) 対象工具経路

(b) エアカット除去後の工具経路

図 6. 31 凹部のエアカット除去処理例



(a) 対象工具経路

(b) エアカット除去後の工具経路

図 6. 32 等高線経路のエアカット除去処理例

6. 6 高精度NC加工シミュレーションシステムの構成

高速高精度加工化が進み、要求精度が数十 μm から数 μm になると、NC加工シミュレーションにおいて従来は考慮されていなかったさまざまな現象を考慮する必要がある。NC加工シミュレーションにおいても、従来のように工具を剛体として加工後の形状を求めるのではなく、機械の運動誤差や工具のたわみや熱変形などの物理現象をNC加工シミュレーションに再現し、NC加工シミュレーション後の形状に反映する必要がある。

このためには、高速で、精度良くNC加工シミュレーションができると共に、さまざまな誤差要因をNC加工シミュレーションに反映する必要がある。本研究では、この問題を解決する手法としてBoundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレーションを提案している。図6.33に提案する高精度NC加工シミュレーションシステムの構成図を示す。提案するシステムは、大別するとCNCシミュレーション部、工作機械シミュレーション部、および形状除去処理部から構成される。また、工具やワークをBoundary-Map形状モデルに変換する形状変換処理部を持つ。

CNCシミュレーション部はCNC装置の内部処理を再現し、NCプログラムを解析し、補間処理、加減速処理そしてサーボ処理を経てサーボサンプリングタイムにおける位

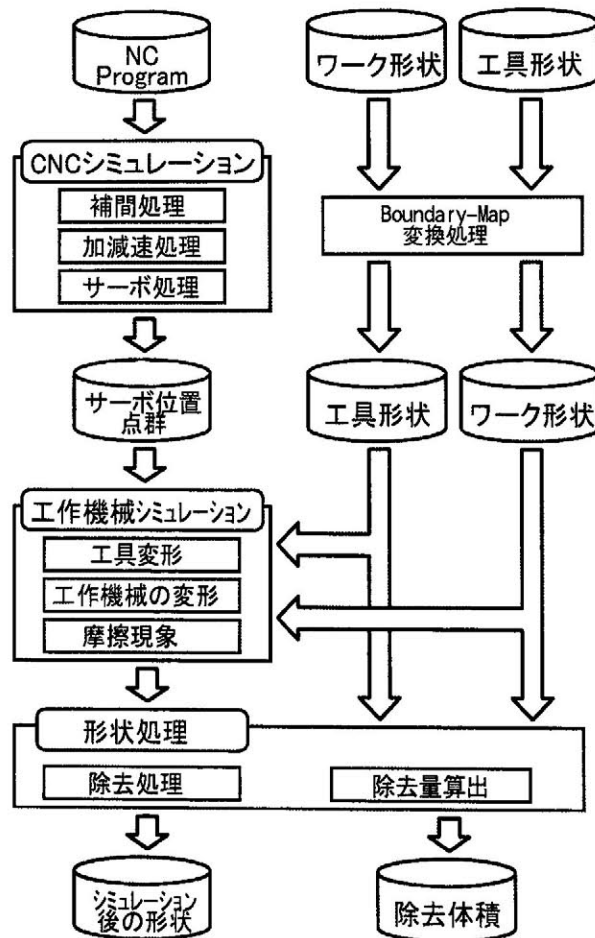


図6.33 高精度NC加工シミュレーションシステム構成

置データであるサーボ位置点群データを生成する。工作機械シミュレーション部では、サーボデータ位置を表す点群情報に基づいて加工を行った場合に発生する物理現象である工具の変形や、工作機械の変形、あるいは摩擦による現象をシミュレーションし、工具やサーボデータ位置点群情報を変化させる。形状除去処理部では、これらの各点においてワーク形状から変形を含んだ工具形状を除去する事により、NC加工シミュレーションを行っている。この時、各サーボ位置ごとに求められる除去体積を求めると共に、工具の負荷情報として工作機械シミュレーション部に出力し、除去量としてファイルに保存する。

提案する高精度NC加工シミュレーションシステムの内、本章では、CNCの運動誤差をCNCシミュレーション部でシミュレーションすると共に、工作機械シミュレーション部では、工具のたわみについてシミュレーションを行う。

工作機械の制御系に起因する誤差の代表である運動誤差と加工中の物理現象の代表である工具のたわみについて、NC加工シミュレーションに適用できれば、その他の誤差要因にも同様の手法で誤差をNC加工シミュレーションに適用できると考えられる。

6. 7 運動誤差を考慮したNC加工シミュレーション

6. 7. 1 運動誤差モデル

一般に、CNC工作機械においてNCプログラムにより指定された軌跡上を実際の工具が通らない現象が生じる。この誤差を運動誤差、あるいは追従誤差と呼んでいる。運動誤差が加工誤差として顕著に表れるのは高速な送り速度で円弧切削を行った場合や直角のコーナ部を加工した場合である。円弧切削においては指令円弧より実際の円弧が小さくなる円弧半径減少が生じ、コーナ部では角がダレるなどの現象が生じる。これらの原因はCNC装置内部での補間処理、補間後の加減速処理、そしてサーボの追従遅れによるものである。一般の工作機械において用いられる比例制御により構成されるCNC装置では、指数加減速処理とサーボ処理はそれぞれ1次遅れ系で表現でき、図6.34に示すブロック図で表される。

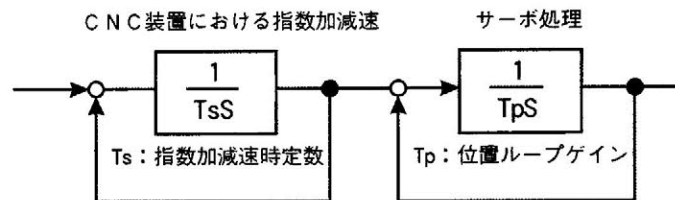


図6.34 CNC装置の処理のブロック図

図6.34に示す系において円弧指令を与えたときの円弧半径減少量 ΔR は(6-1)式で与えられる^{[25][165]}。ここで、 R は指令半径[mm]、 F は送り速度[m/min]、 T_s は加減速時定数[sec]、 T_p はサーボの位置ループ時定数[sec]である。

$$\Delta R = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{2} T_s^2 + \frac{1}{2} T_p^2 \right) \left(\frac{F \times 10^3}{60} \right)^2 \quad (6-1)$$

6. 7. 2 運動誤差の適用

CNC装置の補間処理とサーボ処理の遅れによって生じる運動誤差は、加工中の物理的な現象には関係なく、CNC装置内部の処理に起因する誤差である。そして、追従誤差の結果は最終的に工具が通過した位置情報となる。本研究では、CNC装置内部で行われている補間処理と加減速処理を忠実にシミュレーションすると同時に、サーボ処理を一次遅れ系のフィルターを通すことによってシミュレーションを行った。

運動誤差をシミュレーションするための手順を図6.35に示す。NCプログラムは補間処理部によって各軸に分配される。この時、補間処理は補間周期毎に行われる。CNC装置内では、補間処理の周期とサーボアンプへ出力するサーボサンプリング周期が異なる

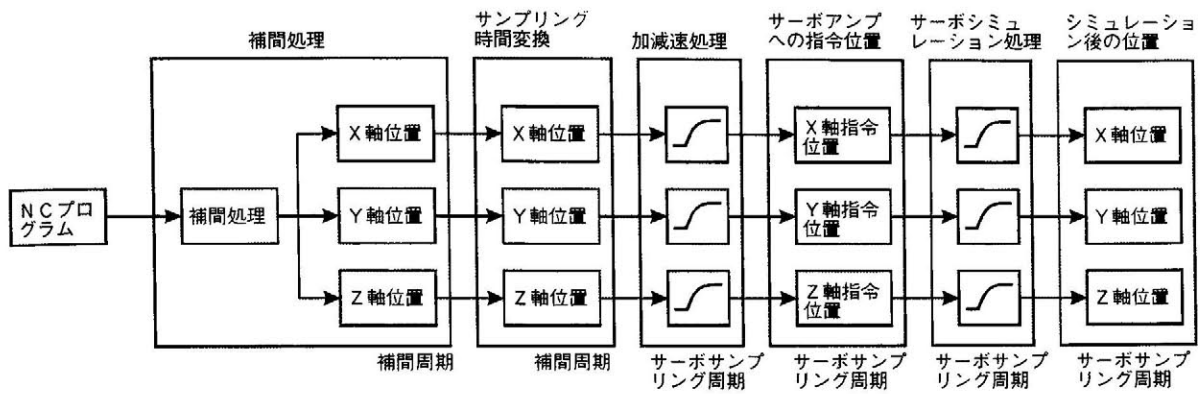


図 6. 3 5 運動誤差のシミュレーション手順

場合があるため、補間周期からサーボサンプリング周期に変換する処理を設ける。変換処理は、補間された直線をサーボサンプリング時間でさらに分割している。例えば、補間周期が10msで、サーボサンプリング周期が2msならば、補間された位置を5等分する。

位置データをサーボサンプリング周期に合わせた後、加減速処理を行う。本システムでは加減速処理として指数加減速と、直線加減速のシミュレーションが可能である。それぞれ、1次遅れ、リニアフィルターを通すことによって処理を行う。この処理の結果得られた位置データは、CNC装置が実際にサーボアンプに出力している位置指令となる。ここまでの処理は、CNC装置が実際にリアルタイムで行っている処理をオフラインで行ったのと同じであり、CNC装置で行われているドウェル処理も再現することができる。

その後、サーボアンプに出力される指令位置を受け取ったサーボモータがどのように動作するかをシミュレーションを行う。サーボ処理は1次遅れ系で表現できるため、指数加減速処理と同様に各軸指令位置に基づいて1次遅れのフィルターを通すことによってサーボの追従誤差を再現する。

このようにして、CNC装置の補間、加減速処理そしてサーボの追従誤差までをシミュレーションすることができる。そして、得られた軌跡に基づいて素材から工具の移動に伴い除去処理を行うことにより、NC加工シミュレーション後の形状に運動誤差を再現することが可能となる。

6. 7. 3 運動誤差のNC加工シミュレーション結果

開発したNC加工シミュレーションにおいて、CNC装置の内部処理である補間と加減速処理、そしてサーボのシミュレーション処理が実行できているか確認するために検証を行った。検証は、円弧指令値とシミュレーション後の軌跡を比較すると共に、円弧半径減少量の理論値との比較により行った。円弧半径は25mmで、送り速度4000mm/min、補間周期、サーボ周期1msの条件で、加減速時定数(Ts)と位置ループ時定数(Tp)を20, 30, 40, 50msに変化させたときのシミュレーション軌跡を図6.36に示す。

同図より、加減速時定数、位置ループ時定数が大きくなるに従って円弧軌跡が内側に入っており、円弧半径減少量が大きくなっていることがわかる。

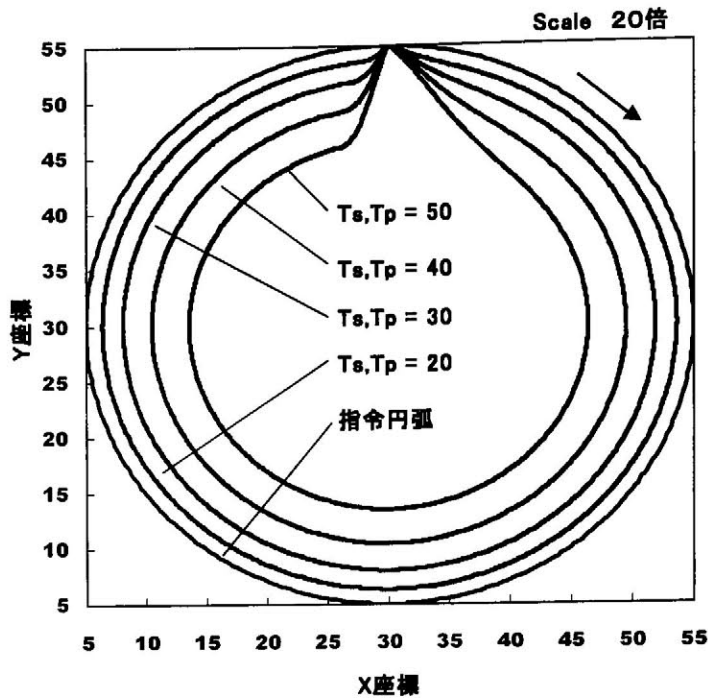


図6. 36 CNC装置とサーボ処理のシミュレーションによる軌跡

また、図6. 36と同じ条件で、補間周期とサーボサンプリング周期を同じ値にして1, 5, 10msに変化させたときの円弧半径減少量を求め、理論値と比較した結果を表6. 3に示す。表6. 3に示す円弧半径減少量の単位はmmである。また、図6. 37に、これらの関係をグラフに表した図を示す。ここで、理論値は円弧半径減少量を(6. 1)式より求めた値であり、補間周期には依存しない値である。

表6. 3 円弧半径減少量の測定結果

時定数 ms	20	30	40	50
理論値	0.071	0.160	0.284	0.444
補間周期= 1 [ms]	0.067	0.154	0.274	0.428
補間周期= 5 [ms]	0.053	0.133	0.246	0.394
補間周期=10 [ms]	0.036	0.106	0.212	0.351

表6. 3より、補間周期とサンプリング周期が1msの時に円弧半径減少量のシミュレーション結果が理論値とほぼ一致していることがわかる。また、図6. 37より、シミュレーションの精度は、補間周期とサーボサンプリング周期が大きくなるに従って精度が悪くなっていることがわかる。これらのことより、NC加工シミュレーションにおけるCNC装置とサーボ処理を正確にシミュレーションできていることが明らかになった。

次に、開発したNC加工シミュレーションによって円弧半径減少量が、NC加工シミュレーション後の形状に反映されているかを確認するため、TsとTpを64msに固定し、半

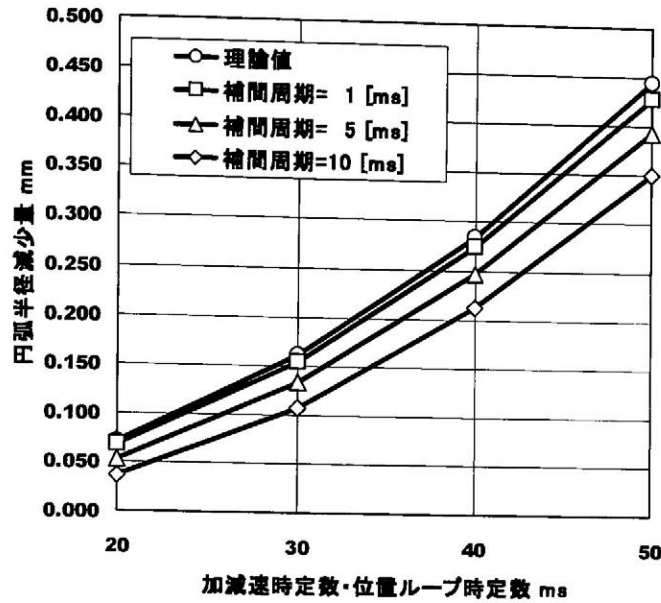


図6. 37 シミュレーションによる運動誤差の補間周期による比較

径5mmのエンドミルを用いて、半径25mmの円柱に対し、送り速度を変えてNC加工シミュレーションを実行した。また、同時に実際に補間周期、サーボサンプリング周期が7msであるCNC工作機械を用いて加工を行い、NC加工シミュレーション結果と比較した。

表6. 4は、送り速度をそれぞれ5000, 3000, 1000, 500 mm/minに変えてNC加工シミュレーションを行った場合の円弧半径減少量の理論値、NC加工シミュレーション後の形状断面ならびに実加工終了後の形状断面から求めた円弧半径減少量を比較した結果である。NC加工シミュレーションは補間周期を1, 7, 8msに変えて行った。なお、NC加工シミュレーションに要した時間は全て数秒である。

表6. 4 NC加工シミュレーション結果の比較

送り速度 mm/min	円弧半径減少量				
	理論値	シミュレーション後の形状			加工後の 形状
		IT=1ms	IT=7ms	IT=8ms	
5000	1.1378	1.0720	1.2149	1.4242	1.2509
3000	0.4096	0.3969	0.4494	0.5289	0.4653
1000	0.0455	0.0448	0.0507	0.0598	0.0526
500	0.0114	0.0113	0.0127	0.0150	0.0132

表6. 4の結果より、補間周期が1msの場合が、最も理論値に近いことがわかる。また、実加工に用いたCNC装置の補間周期である7msの場合に、NC加工シミュレーション結果と実加工の測定結果が最も近いことがわかる。

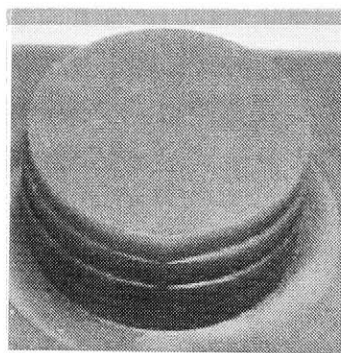
図6. 38は、補間周期7msでの実際に加工した後の形状とNC加工シミュレーション後の形状を表示している。スキャンラインの格子間隔は1mm/divであり、粗い格子間隔においても、円弧半径減少量がミクロン単位で精度良くシミュレーションされ、加工後

の形状精度に対応していることがわかる。

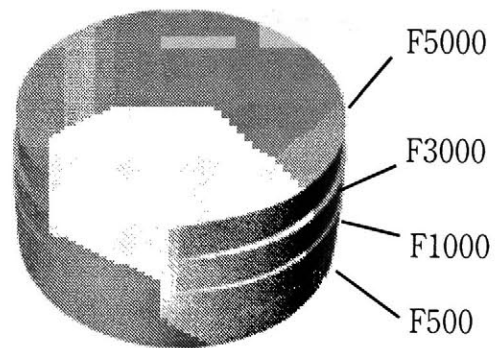
また、NCプログラムにおけるドウエルの動作を確認するため、直角に曲がる工具経路に対してNC加工シミュレーションを行った。運動誤差シミュレーションではCNC装置が行う補間、加減速処理をそのままオフラインで計算しているため、NCプログラムの中にドウエルがあった場合は、ブロックの指令値とドループ（偏差）が無くなるまで次のブロックの処理を行わなくする（インポジションチェック）ことによりドウエルを再現している。図6. 38は送り速度を5000mm/minに固定し、ドウエル時間を変化させた場合の実加工後とNC加工シミュレーション後の形状を示している。工具は半径5mmのエンドミル、TsとTpはいずれも50ms、補間周期は全て7msとしてシミュレーションを行った。

同図より、ドウエル時間を500、100、50msとした場合は、インポジションチェックにより誤差は発生せず、ドウエルが無い場合にはコーナにダレを生じる事がわかる。また、NC加工シミュレーション結果は実加工後の形状とほぼ同じである。ドウエルが無い場合の形状が少し異なる原因は、使用したCNC装置と開発した運動誤差シミュレーションのインポジションチェックの許容量が異なるためであると考えられる。

以上の結果より、開発した高精度NC加工シミュレーションは、粗い格子間隔であっても、CNC装置の処理を正確に再現すると共に、サーボの追従誤差までを正確にNC加工シミュレーション後の形状に再現できることが明らかになった。

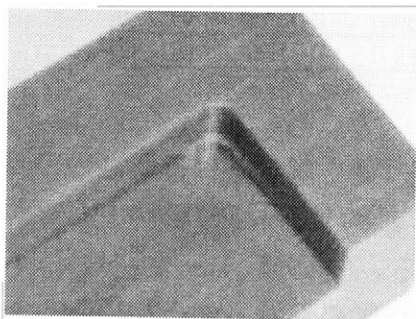


(a) 実加工の結果

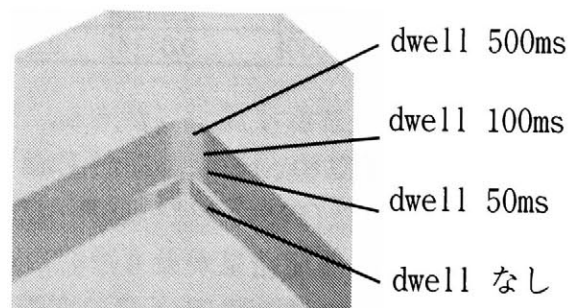


(b) NC加工シミュレーション結果

図6. 38 高精度NC加工シミュレーションシステム構成



(a) 実加工後の形状



(b) NC加工シミュレーション後の形状

図6. 39 ドウエルの効果の検証

6. 8 工具のたわみを考慮したNC加工シミュレーション

6. 8. 1 工具のたわみモデル

加工中における工具のたわみは、加工における主要な誤差要因のひとつである。従来から加工実験が繰り返され、その誤差量を推定する手法が研究されている。工具のたわみの主原因は加工中における切削抵抗であり、切削抵抗はまた、加工中における除去量に関係することがわかっている。

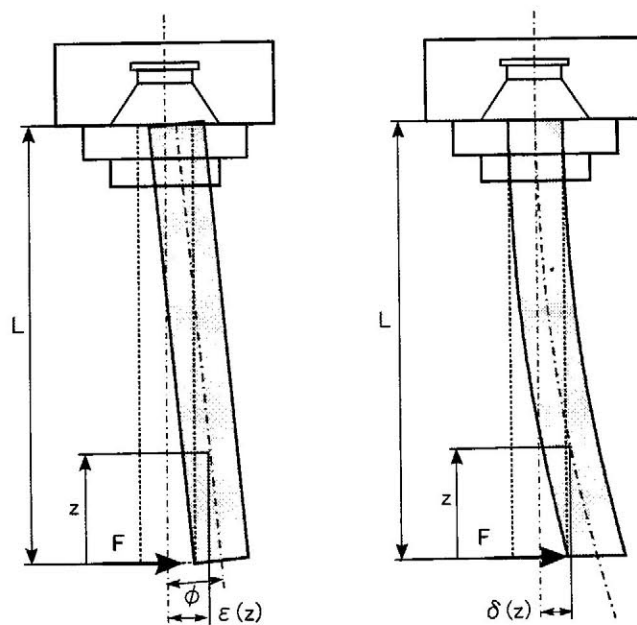
切削抵抗を求める手法としては、さまざまな手法が提案されているが、NC加工シミュレーションは、加工中における除去量を比較的簡単に求めることができるため、切削抵抗や工具のたわみの計算に多用されている。

本研究においても、NC加工シミュレーションにより得られた除去体積より切削抵抗を求める手法を用いた。工具のたわみを求めるには、できるだけ簡易的に切削抵抗を求めることができる計算式を用いる必要があるため、切削抵抗の推定には、実験的に求められた除去体積と切削抵抗の関係を示す(6-2)式を用いた^[166]。

$$F = \alpha V^p \quad (6-2)$$

ここで、 F [kgf]はエンドミルに作用する曲げ抵抗、 V [mm³]は工具1回転当たりの除去体積で、 α 、 p は被削材別の定数である。

切削力による工具のたわみ変形は、一般に図6.40(a)に示す工具変位量 $\epsilon(z)$ と、



(a) 工具変位 (b) 工具のたわみ

図6.40 工具のたわみ変形量

(b) に示すたわみ量 $\delta(z)$ の総和で表される。 $\varepsilon(z)$ は切削力 F により工具の取り付け剛性により工具が振れる量であり、 $\delta(z)$ は切削力 F による工具のたわみを表している。 工具の長さを L とし、工具先端に切削力が作用しているとすると、工具先端から z の位置における工具の変位量 $\varepsilon(z)$ は (6-3) 式で表される。

ここで、 E_h 、 E_r は工具と工作機械の組み合わせにより決まる比例係数である。

また、工具先端から z の位置にあるおけるたわみ $\delta(z)$ は (6-4) 式で表される。

$$\varepsilon(z) = E_h \times F + E_r \times L \times (L - z) \quad (6-3)$$

$$\delta(z) = F \times (L - z)^2 \times (2L + z) / 6EI \quad (6-4)$$

ここで、 E [kgf/mm^2] は工具材料の弾性係数、 I は断面 2 次モーメントである。 I の計算に用いる工具半径は、一般に工具径の 60 ~ 70 % の値を用いる^[167]。

(6-3) 式と (6-4) 式より、工具先端から z の位置にあるたわみ変形量 $D_{ef}(z)$ は (6-5) 式で表される^{[150][168]}。

$$D_{ef}(z) = \varepsilon(z) + \delta(z) \quad (6-5)$$

以上のことより、NC加工シミュレーションにより得られた除去体積を、工具一回転一刃当たりの除去体積に換算し (6-5) 式に代入することにより、工具の変形量を求めることが可能となる。

6. 8. 2 工具のたわみの適用

(1) 一回転一刃当たりの送り量の算出

切削中における工具のたわみ量を求めるには、一回転一刃当たりの除去体積を求め、切削抵抗を算出する必要がある。そして、一回転一刃当たりの除去体積 V [$\text{mm}^3/\text{rev}/\text{tooth}$] を求めるにはまず、一回転一刃当たりの送り量を求める必要がある。送り速度 F [mm/min]、主軸回転数 N [rpm]、刃数 z [枚] が与えられた場合、図 6. 4 1 に示す、一回転一刃当たりの送り量 f_t [$\text{mm}/\text{rev}/\text{tooth}$] は (6-6) 式で求められる。

$$f_t = \frac{F}{N \times z} \quad (6-6)$$

(2) 一回転一刃当たりの除去体積の算出

Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションでは、サーボサンプリング周期当たり位置情報から除去処理を行っているため、求まる除去量はサーボサンプリング周期当たりの除去量であり、一回転一刃当たりの除去量ではない。一回転一刃当たりの除去量を求めるには、NC加工シミュレーションで求めているサーボサンプリング周期当た

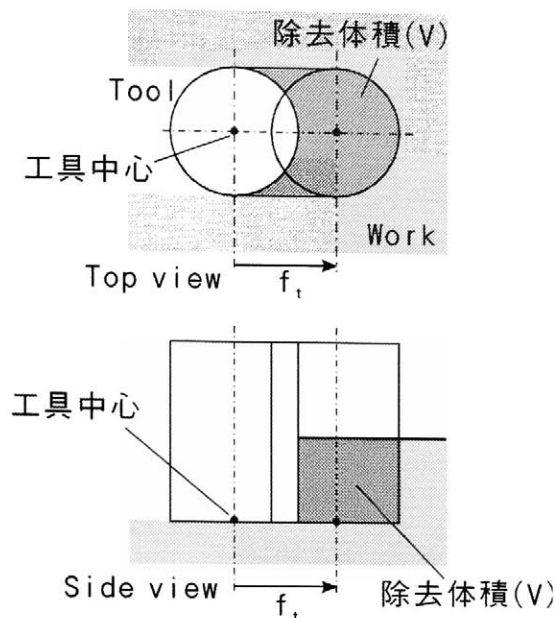


図6. 4 1 一回転一刃当たりの送り量

りの除去量を，一回転一刃当たりの除去量に変換する必要がある。

図6. 4 2に，Boundary-Map形状モデルに基づくNC加工シミュレーションにより求めたサーボサンプリング周期当たりの除去体積を，一回転一刃当たりの除去量に変換する手順を示す．図中の f_t は，一回転一刃当たりの送り量で， dF はサーボサンプリング周期当たりの移動量である．また， P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 はサーボサンプリング周期当たりの位置であり， $V_{01}, V_{12}, V_{23}, V_{34}$ は，それぞれ $P_0-P_1, P_1-P_2, P_2-P_3, P_3-P_4$ に移動した際に得られるサーボサンプリング周期当たりの除去体積である．

除去処理を行うサーボサンプリング周期当たりの位置が P_0 であり，現在の工具の中心位置が P_n である場合，まず， P_n から進行方向に長さを足し合わせ，一回転一刃当たりの送り量 f_t を越えたサーボサンプリング周期での位置を求め，その長さを L_{en} とする．同時に，各サーボサンプリング周期での除去体積を求める．図6. 4 2の場合は， P_1, P_2, P_3 が f_t 内に含まれ， P_4 が f_t を超えた点となり， P_n-P_4 の距離が L_{en} となる．そして，求めた除去体積を L_{en} と f_t の比率により分配することにより，一回転一刃当たりの除去量を求める．図6. 4 2の場合の L_{en} における除去体積 V_t は(6-7)式で求めることができ，換算した一回転一刃当たりの除去体積 V は(6-8)式で表される．

$$V_t = V_m + V_{01} + V_{12} + V_{23} + V_{34} \quad (6-7)$$

$$V = V_t \times \frac{f_t}{L_{en}} \quad (6-8)$$

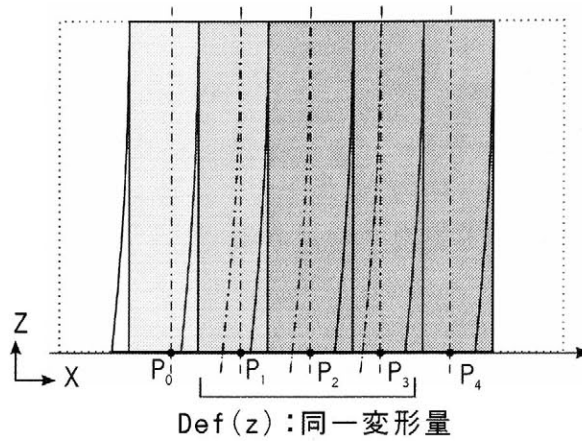
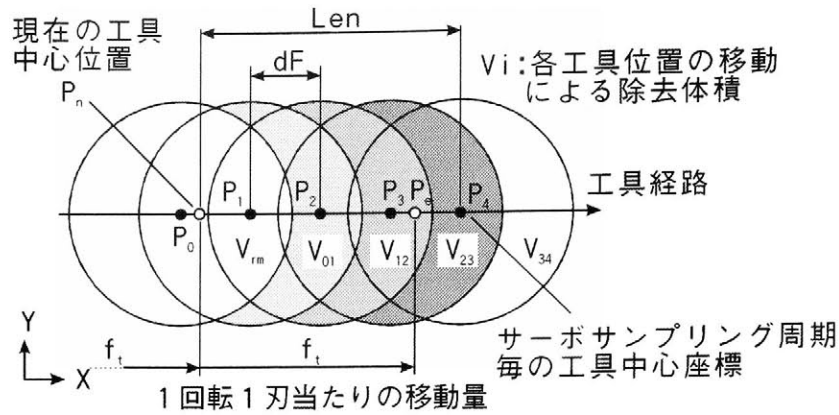


図6. 4 2 一回転一刃当たりの除去体積の算出

ここで、 V_{rm} は現在の工具位置がサーボサンプリング周期毎の位置情報と異なる場合の除去体積の端数であり、(6-9)式により求める。

$$V_{rm} = V_t - V \quad (6-9)$$

このようにして求めた一回転一刃当たり除去体積を(6-2)式に代入することにより切削抵抗を求める。

(3) たわみによる工具の形状変形と除去処理

NC加工シミュレーションで求めた除去体積から切削抵抗を求めることにより、工具先端から z の距離にある工具のたわみ量は(6-5)式で求めることができる。素材からたわんだ工具形状を除去するには、工具形状をたわみにより変形させる必要がある。Boundary-Map形状モデルのNC加工シミュレーションでは、工具をBoundary-Map形状データ方式であるスキャンライン上のリストデータで保持しているため、工具の変形もリストデータの変形で実現できる。

工具形状の変形はXY, YZ, ZX平面毎のスキャンラインについて行う。図6. 4 3は、YZ, ZX平面におけるX, Y方向の工具形状の変形手法を示している。例えば、工具先端位置から z の距離にあるX方向のスキャンライン L_s における工具のリストは、変

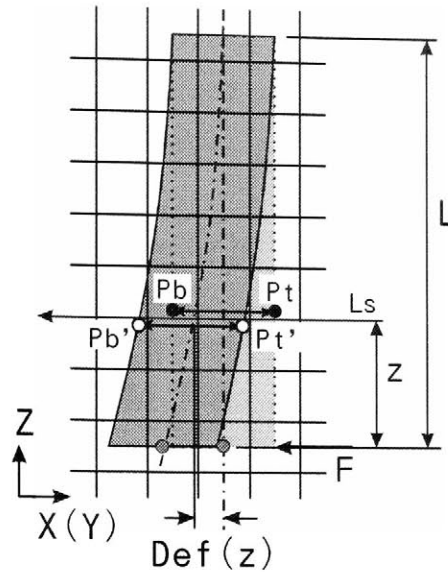


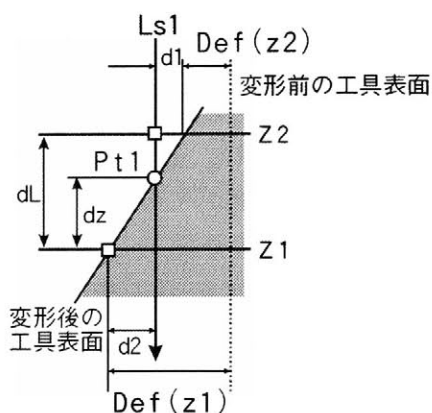
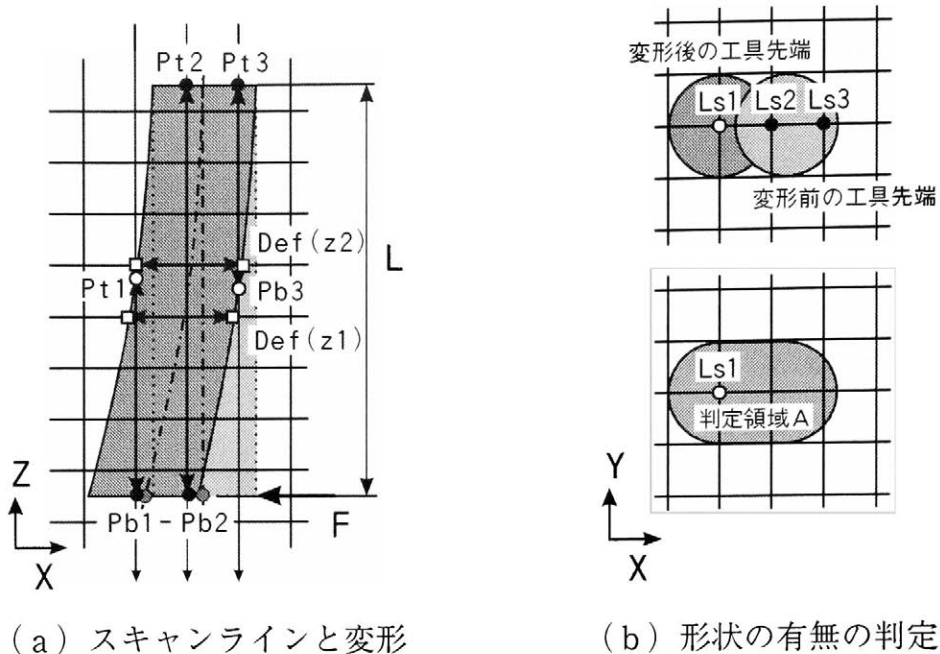
図6. 4 3 たわみによる工具形状のX, Y方向の変形

形前は P_t , P_b である。切削抵抗 F が工具先端に作用することによって、スキャンライン L_s 上ではたわみ変形量 $Def(z)$ が発生し、 $-X$ 方向にたわむ。このたわみ量 $Def(z)$ を P_t , P_b に足し合わせた座標である $P_{t'}$, $P_{b'}$ が変形後の工具のリストとなる。この処理を YZ , ZX 平面の工具を構成するすべてのスキャンラインについて行うことにより、 X , Y 方向に対する工具の変形を表現する。

一方、 XY 平面における Z 方向については変形量を直接求めることができないため、異なる処理が必要となる。図6. 4 4 に Z 方向の工具変形形状を求める手法を示す。例えば、図6. 4 4 (a) に示す Z 方向のスキャンライン L_{s1} の場合、工具の変形前は工具形状がないため、スキャンライン L_{s1} 上には形状を示すリストは存在しない。しかし、変形によって工具リスト P_{t1} - P_{b1} を生成する必要がある。変形前後でリストが存在するか判定するには、図6. 4 4 (b) に示すように、計算するスキャンラインが変形前後の工具先端円を含む領域 A 内にあるかによって判定する。領域内にある場合には変形により工具形状を示すリストが存在する。変形後のリストが存在する場合は、工具の先端から XY 方向の変形量を計算しながら $+Z$ 方向に探索を行い、各 Z 高さにおいてスキャンラインが円弧内から外に出る高さ Z を探索する。スキャンライン L_{s1} の場合は、高さ Z_1 では工具円弧内に存在するが、高さ Z_2 では工具円弧内に存在しないため、リスト端 P_{t1} は Z_1 と Z_2 の間に存在することがわかる。そこで、図6. 4 4 (c) に示すように、高さ Z_1 , Z_2 におけるスキャンラインからの工具端間での距離 d_1 と d_2 を求める。そして、格子間隔 dL を基準に工具の変形後の表面を直線近似して (6-10) 式より求める。

$$dt_1 = Z_1 + dL \times \frac{d_2}{d_1 + d_2} \quad (6-10)$$

また、スキャンライン L_{s2} のように、スキャンラインが工具変形前内の円弧にある場合は、変形しても工具のスキャンラインは変わらないので、工具のリストデータは変更しない。スキャンライン L_{s3} のように、スキャンラインが変形前の工具円内にあつて、変



(c) Z 高さの算出

図 6. 4 4 たわみによる工具形状の Z 方向の変形

形前の工具円内にない場合は、下側にスキャンラインに新たに交点を求める。交点の求め方はスキャンライン L_{s1} と同様に線形補間して求める。

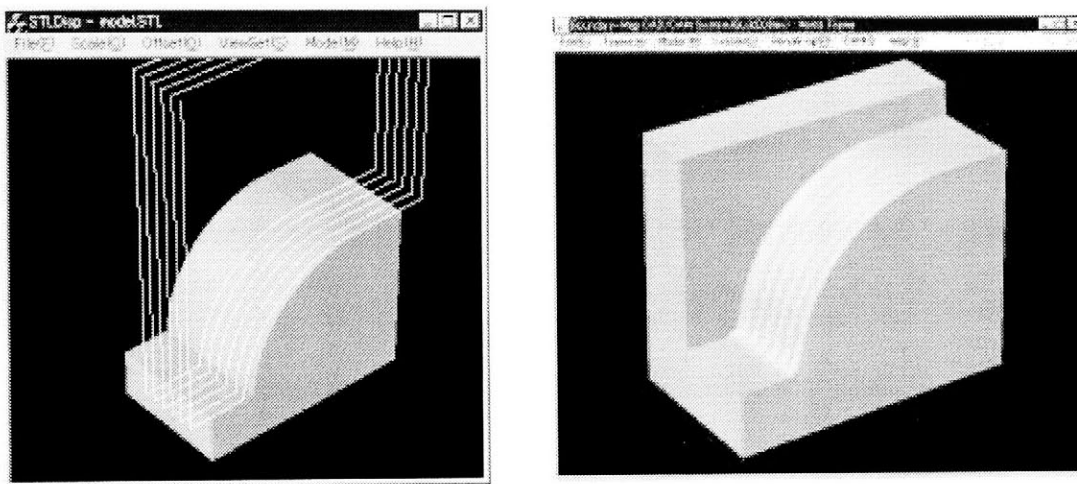
このようにして求めたスキャンラインについて、NC加工シミュレーションの除去機能を用いて素材から変形後の工具形状を除去する。

除去処理を、サーボサンプリング周期当たりの位置について行い、移動長さが一回転一刃当たりの送り量 f_t を超えた場合には、一回転一刃当たりの送り量での除去体積を求め、切削抵抗から工具のたわみ量を求めて工具を変形させ、除去処理を行う。この処理を行うことにより、工具変形に対応したNC加工シミュレーションを実現している。

6. 8. 3 工具のたわみのNC加工シミュレーション結果

提案する手法により, 運動誤差と工具の変形を合わせたNC加工シミュレーションが実行できるかを確認するため, 図6. 45 (a) に示すような工具経路で半径50mmの円柱を横にした形状の削り出しを行い, NC加工シミュレーション後の断面形状から加工誤差を算出した。

使用したエンドミルは変形量を大きくするため, 長さ120mm, 半径5mmとし, 材質はS50Cとしている. 工作機械と工具の関係を実際に測定する必要がある E_r , E_h については, 論文を参考に値を決めた^[150]. NC加工シミュレーションに用いた値は $E_r=1.04 \times 10^{-4} [1/Nm]$, $E_h=0.165 [\mu m/N]$ である.



(a) 工具経路 (b) NC加工シミュレーション後の形状

図6. 45 工具のたわみを考慮したNC加工シミュレーション

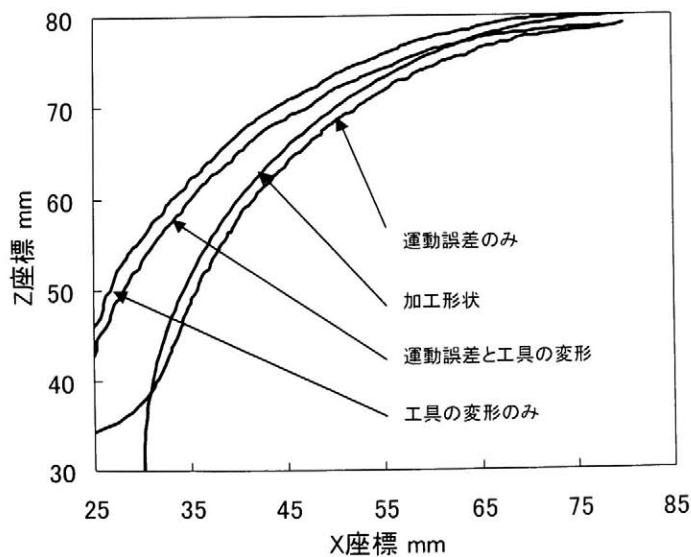


図6. 46 NC加工シミュレーション後の形状断面

図6.45(b)は、工具の運動誤差と変形を考慮してNC加工シミュレーションを行った後の形状を示している。

図6.46は、NC加工シミュレーション後の形状断面から求めた円弧形状から加工形状との誤差を求め、円弧の外周方向に10倍して表示した図である。NC加工シミュレーションは、運動誤差のみを考慮した場合、工具の変形のみを考慮した場合、両方を考慮した場合について行った。

同図より、運動誤差だけを考慮した場合は運動誤差によって円弧半径減少が生じ、NC加工シミュレーション後の断面は内側に入ることがわかった。また、工具のたわみだけを考慮した場合は、工具のたわみによって、加工後の断面は要求形状よりも大きくなることがわかった。さらに、運動誤差と工具の変形を考慮した場合、これらの総和が加工後の形状断面になっている事がわかった。これらのシミュレーションについて、実際に加工を行って検証していないが、一般に予想できる結果となる。

なお、送り速度6000mm/min、空間格子は1mmとし、これらのNC加工シミュレーションに要した時間は、Pentium II 450MHzを用いて1分38秒で、1点当たり4ms平均で除去処理を行っている。

工具のたわみに関しては加工実験を行わなかったため、たわみシミュレーションの精度を評価することができなかったが、提案する手法で工具のたわみを加工後の形状に再現できることは確認できた。また、提案する手法で運動誤差と工具のたわみといった複数の誤差を同時にシミュレーションし、加工後の形状に反映できることも確認できた。

6. 9 総括と結論

本章では、視点や画面サイズに関係なく、工具のたわみや熱変形などを含めて高速で高精度なNCプログラムの加工シミュレーションが行えるNC加工シミュレータの実現を目的に開発を行った。NC加工シミュレーションに用いる形状モデルには、第3章で提案したBoundary-Map形状モデルを用いた。そして、Boundary-Map形状モデルを用いた形状除去処理アルゴリズムとNCプログラムを補間して点群化する補間処理を開発し、両者を組み合わせて加工シミュレーションを構成した。開発したNC加工シミュレーションシステムを用いて、加工現場で使用されたNCプログラムによりNC加工シミュレーションを実行すると共に、形状除去における除去量の算出手法を開発し、エアカットの工具経路を削除する機能に適用した。さらに、開発したNC加工シミュレーションを汎用のNC加工シミュレーションと処理速度、干渉チェックの精度に関して比較を行った。

そして、より高精度なNC加工シミュレーションを行うために、CNC工作機械工作機械で生じる運動誤差や切削中の工具のたわみなどを加工後の形状に反映させることができるNC加工シミュレーション手法を開発した。

これらの結果を要約すると以下ようになる。

- (1) Boundary-Map形状モデルを用いて、形状除去と除去体積の算出が可能であることを確認した。
- (2) NC加工シミュレーションに用いる工具は任意形状でもNC加工シミュレーション可能で、シミュレーション対象とする形状はオーバハングを持つ形状でもシミュレーションできることを確認した。
- (3) 実際に加工現場で用いられるNCプログラムを用いて、開発したNC加工シミュレーションを実行した結果、開発したNC加工シミュレーションが実用可能なシステムであることを確認した。
- (4) 汎用のNC加工シミュレーションと比較することにより、Boundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレーションは、シミュレーション後の精度を同じに保ちながら、ブロック数に関係なく一定時間で高速に処理できることを確認した。また、干渉チェックについては、汎用のNC加工シミュレーションと比較して高精度に実行できることを確認した。
- (5) 除去体積算出処理を利用して、エアカット経路について従来のように送り速度を上げたり、早送りにするなどの送り速度の制御のみを行わず、エアカット経路を削除し、直接工具経路自体を変更する手法を用い、加工距離の短縮化を図った。その結果、開発した手法を用いることにより、エアカットを含む工具経路が大幅に削除できることを確認した。
- (6) さらに高精度なNC加工シミュレーションを実現するため、工作機械の運動誤差を、NC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を開発した。開発した手法は、NCプログラムに基づいてCNC装置内部で行われる補間、加減速処理を模倣すると共に、サーボ処理のシミュレーションを行い、運動誤差を含んだ位置を求め、各位置に

において素材から工具形状を除去することにより実現している。この処理によってNC加工シミュレーション後の形状に運動誤差が反映できることを確認した。

- (7) 運動誤差を再現したNC加工シミュレーションの精度を検証するために、実際に加工実験を行い円弧半径減少量と加工後の形状について比較を行った。その結果、開発したNC加工シミュレーションは粗い格子間隔でも、ミクロン単位の運動誤差を精度良く再現すると共に、NCシミュレーション後の形状に、加工実験後と同じ運動誤差が再現できることを確認した。また、CNC装置で行われるドゥエル処理の効果も再現可能であることを確認した。
- (8) 高精度なNC加工シミュレーションを実現するため、加工中の切削力により生じる工具のたわみをNC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を開発した。開発した手法は、切削除去体積より切削抵抗を求め、工具のたわみを算出すると共に工具を変形させて、素材形状から除去処理を行う手法である。その結果、NC加工シミュレーション後の形状に工具のたわみが再現できることを確認した。
- (9) NC加工シミュレーションの誤差シミュレーションに運動誤差と、工具のたわみの両方をシミュレーションさせることにより、誤差を複合したNC加工シミュレーションが実行可能であることを確認した。

以上の結果より、Boundary-Map形状モデルを用いることにより、高速で高精度なNC加工シミュレーションを実現することが可能であることが明らかになった。さらに、Boundary-Map形状モデルを用いることにより、運動誤差や、加工中の工具のたわみを高速に、精度良く再現できることを確認した。

これらの結果から、Boundary-Map形状モデルはCAMにおける高速、高精度な工具経路生成だけでなく、高速高精度なNC加工シミュレーションに適応でき、形状定義から加工現象に至るまでの加工システム全体で使用できる形状モデルであることが明らかになった。

本研究では、工具のたわみに対する検証を行うまでに至らなかったため、検証が今後の課題となる。また、本研究で対象とした誤差は、高速高精度加工において生じる誤差の一部でしかないが、各誤差に対して正確な誤差モデルを構築し、複数の誤差をNC加工シミュレーションに取り込む必要がある。

参考文献

- [148]畑篤：NCデータ検証ソフト「NCVIEW」, 型技術, 第12巻, 第5号(1999), pp75-80
- [149]ファモテイク株式会社：VERICUT Ver4.0 ユーザマニュアル(1999)
- [150]高田祥三, 山崎好幸：切削状態予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム, 日本機械学会論文集 (C編), 61, 581(1995), pp.266-272
- [151]Takata, Inui and Sata:A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model, Annals of the CIRP, 38(1989), pp.417-420
- [152]B. K. Choi and R. B. Jerard: Sculptured Surface Machining - Theory and Applications -, Kluwer Academic Publilshers(1998)
- [153]Wang, W.P. and Wang, L.K. : Real-time verification of multiaxis NC programs with raster graphics, Proceedings of the IEEE Intl Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, 7-10 April(1986), pp.166-171
- [154]Wang, W.P. and Wang, L.K. : Geometric modeling for swept volume of moving solids, IEEE Computer Graphics and Applications, Dec., 6(12), (1986) pp.8-17
- [155]Hook, T.V., Real Time Shaded NC Milling Display, SIGGRAPH, 20-4(1986), pp.15
- [156]乾正知：NC加工結果の高速な可視化手法－3次元グラフィック装置の利用－, 精密工学会誌, 65, 10(1999), pp.1466
- [157]乾正知, 垣尾良輔：NC加工結果の高速な可視化手法－離散的に表現された切削加工面の高品質な表示－, 精密工学会誌, 66, 7(2000), pp.1043
- [158]W.P. Wang and K.K. Wang : Solid-Modeling-Based Graphics Simulation of Numerically Controlled Machining, 16th CIRP int. Seminar on M.S., Tokyo, July (1984)
- [159]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－システム構築方法－, 精密工学会誌, 56, 5(1990), pp.891-120
- [160]Chappel, I.T. : The use of vectors to simulate material removed by numerically controlled milling, Computer-Aided Design, 15(3), May(1983), pp.156-158
- [161]Jerard, R.B. : Geometric simulation of numerical control machining, Proc. ASME Int'l Computers in Engineering Conf., 31 July-3 Aug. (1989), 2, pp.129-136
- [162]Huang, H. and Oliver J.H. : NC milling error assessment and tool path correction, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 28(4) (1994), pp.287-294
- [163]K. Yamazaki, K. Kojima, C. Sakamoto and T. Saito : Real-Time Model Reference Adaptive Control of 3-D Sculptured Surface Machining, Annals of the CIRP, 40, 1(1995), pp.479-482
- [164]M. C. Leu and F. Lu, D. Blackmore:Simulation of NC Machining with Cutter Deflection by Modelling Deformed Swept Volumes, Annals of the CIRP, 47, 1 (1998), pp.441-446
- [165]三菱電機株式会社：MELDAS300V取扱説明書
- [166]大川出版：でか版技能ブックス2, エンドミルのすべて, (1991), pp.57
- [167]OSG株式会社：エンドミル作業テクニカルデータ, (1991), pp.7
- [168]李勇, 藤井義也, 岩部洋育：エンドミル加工における工具径と切込みの一選定法, 精密工学会誌, 56, 5(1990), pp.917-922

第7章

Boundary-Map 形状モデルに基づく 高精度加工システムの開発

7. 1 はじめに

CAD/CAMシステムおよび、CNC工作機械による加工システムに対する要求精度は、近年数十 μm から数 μm に移り変わろうとしている。数 μm の精度を補償しながら高速高精度加工を実現するには、CNC工作機械における姿勢変形や熱変形、加工中の工具のたわみや摩耗など、さまざまな誤差要因を補正する必要がある。また、高速な加工を行うには、CAMシステムにおける工具経路の高速な生成と、高速加工に対応した高能率な工具経路の生成が必要となる。

現在のCAMシステムでは、高精度な工具経路を生成するために、トレランスを考慮した工具経路が生成されているが、CNC工作機械で生じる誤差について、CAMシステムではほとんど考慮されていない。CAMシステムが生成した工具経路は、NCプログラムとしてCNC装置に渡され、CNC装置により補間・加減速処理されてサーボアンプに位置指令として出力される。工作機械を制御するCNC装置において、制御系に起因する誤差の補正は行われているが、加工中の物理現象による誤差要因についてはほとんど考慮されていない。また、機械の熱変形や姿勢変形、摩擦による非線形誤差などに対しては、各誤差をインプロセス、あるいは予測してNCプログラムに補正值を加えることによって個別に補正している。しかし、インプロセスによる補正手法は、加工中に生じる誤差を高速に精度良く検出する付加設備が必要であるため、量産されるCNC工作機械での実用化は難しい。一方、誤差予測に基づく補正は、特別な装置を用いることなく、補正の実現が可能であるため実用的であると考えられる。

現在の加工システムにおける情報の流れと誤差予測に基づく補正の対象を示したのが図7.1である。従来のシステムではCAD、CAMシステム、CNC装置、そして工作機械とそれぞれ区分けされ、これらの中に誤差や補正に関する情報はほとんど受け渡されていない。また、CAMシステム、CNC、サーボ処理、工作機械で生じる誤差や、加工現象によって生じる誤差に対して誤差を予測し、補正值を求めることができるが、CNC装置に補正信号の入力ポートが無い場合、補正はNCプログラムに対して行われている。予測した誤差を、NCプログラムに対して補正する手法は、簡易で実用化に適しているが、サーボのサンプリング周期に比べてNCブロックの解析時間は長いため、高速な応答が必要な補正には十分に効果を出すことができない。また、実際の誤差は、さまざまな箇所が生じている誤差を複合した結果であるため、複数の誤差を考慮した補正を行う必要がある。

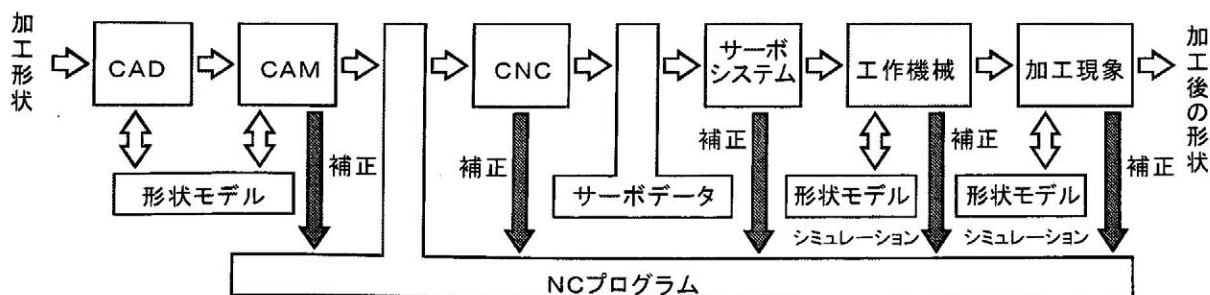


図7.1 現在の加工システムにおける情報の流れと誤差予測補正対象

このような問題点を解決するには、CADシステムから、CAMシステム、CNC装置、工作機械、加工中の物理現象までの全体を考慮して、加工誤差を補正する加工システムを構築する必要がある。そのためには、補正方法、補正単位、補正のタイミングを統一することが重要となる。

ここで、加工システムにおける情報の流れを考えると、まず、加工対象形状と加工条件に基づきCADシステムで定義された形状データからCAMシステムを経て、NCプログラムとして指令軌跡が生成される。そして、CNC装置においてNCプログラムに基づいて、補間、加減速処理された後、サーボサンプリング周期あたりの位置指令データであるサーボデータとして工作機械に転送され、加工を行っている。これらの加工システムにおける情報の流れを見ると、最終的に工作機械に出力しているのは、サーボデータであるため、このデータを上位であるCAD/CAMシステムで直接生成し、CNC装置における制御や加工中の現象の補正をすべて含めた情報をサーボデータ単位に基づいて制御、補正する手法が有効であると考えられる。

そこで、本研究では加工システムで取り扱うデータ単位をすべてサーボデータに統一し、CAD/CAMシステムの形状モデルから直接に補間、加減速処理を行ったサーボデータを生成することにより、指令精度を向上させると共に、加工中に生じるさまざまな誤差に対する補正までをサーボデータ単位に行い、誤差補正する加工システムの開発を提案する。

本研究で提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを実現するには、以下の基本的な処理の開発が必要となる。

- (1) 形状モデルから加減速と補間を直接行うことによりサーボデータを生成し、精度の高い指令値を生成する形状補間処理の開発。
- (2) 加工中の運動誤差や熱によるたわみ等を精度良く再現できるNC加工シミュレーション処理の開発
- (3) NC加工シミュレーション結果より得た誤差から、サーボサンプリング当たりの補正值を求め、サーボデータに対して補正する処理の開発

本章では、Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを実現するために、これらの3つの基礎的な機能に着目し、加工システムの提案を行うと共に、機能開発を行った。加工誤差を発生させる要因としては多くの要因が考えられるが、本章では加工誤差の代表として、工作機械に生じる運動誤差を取り上げ、加工シミュレーションにより得られた誤差値から、サーボサンプリング当たりの誤差データにして補正する手法について検討した。そして、Boundary-Map形状モデルに基づく高精度補正加工システムにおいて、CNC装置の運動誤差に対して補正を行う試作システムを構築すると共に、補正の検証を行った。

提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの中で統一的に使用できる形状モデルとして、第3章で述べたBoundary-Map形状モデルを用いて、Boundary-Map形状モデルから直接サーボデータを生成する手法を開発した。また、第6章で述べたNC加工シミュレーションの結果より得られた加工誤差を、サーボデータに基づいて補正する補正值として用いた。

7. 2 Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システム概念

提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムは、Boundary-Map形状モデルから直接サーボデータを生成すると共に、加工中の誤差を予測して補正することにより、高精度加工を目指すシステムである。図7. 2は、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにおけるデータの流れを示している。工具経路生成に用いる形状と、加工シミュレーションに用いる形状には、両者を統一して用いることができるBoundary-Map形状モデルを用い、CAMシステムで生成するデータはNCプログラムではなく、サーボアンプに直接出力できるサーボデータとする。また、サーボ処理や工作機械の動作、加工中の物理現象によって生じると予測される誤差を求める誤差シミュレーションもBoundary-Map形状モデルに基づき計算され、補正処理の時間単位はサーボサンプリング周期当たりとし、補正量はサーボデータに対して補正する。ここで、誤差シミュレーションには第6章で述べたBoundary-Map形状モデルに基づいたNC加工シミュレーションを用いる。

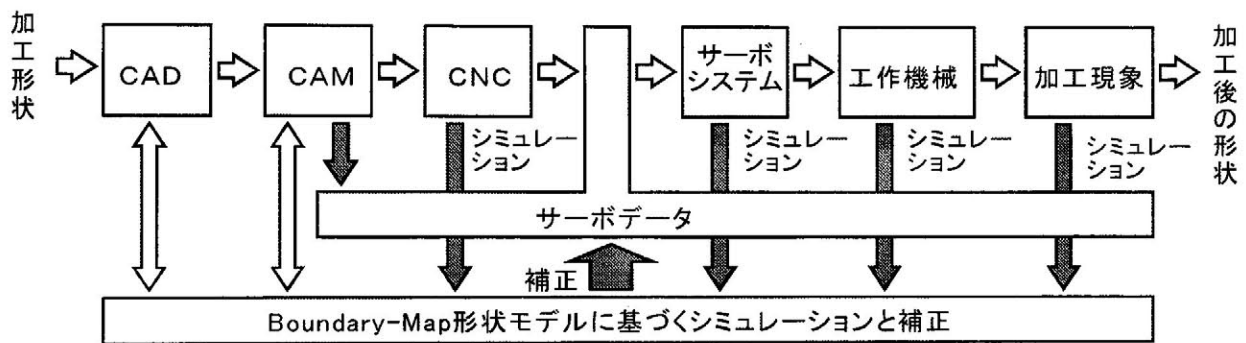


図7. 2 提案する誤差予測に基づく加工誤差補正

図7. 3に、現在の加工システムの一般的な構成図を示す。従来のシステムはCAD、CAMシステム、CNC装置、そして工作機械と明確に区分され、情報は上位のCADから下位の工作機械まで、上位への情報のフィードバック無しに、一方向に流れる。

一方、本研究で提案する、制御指令と補正単位をすべてサーボデータとした加工システムは図7. 4に示す構成となる。システムは大別すると、CAD部、CAM・CNC部を統合した知的サーボデータ生成部ISGS (Intelligent Servo-data Generation System)、パソコンNC (PC-NC) を用いた工作機械部から構成される。提案するシステムでは、従来のCNC工作機械のCNC装置における制御部とサーボ部を分割し、制御部はISGSに組み込む。そして、工作機械にはサーボデータを受け取り、サーボアンプに転送するだけの機能を持たせた装置としてPC-NCを取り付ける。

提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにおいて、加工対象形状は汎用CADシステムからBoundary-Map形状モデルに変換あるいは、直接Boundary-Mapデータとして定義される。そして、CAM部は使用するサーボシステムのサンプリング周

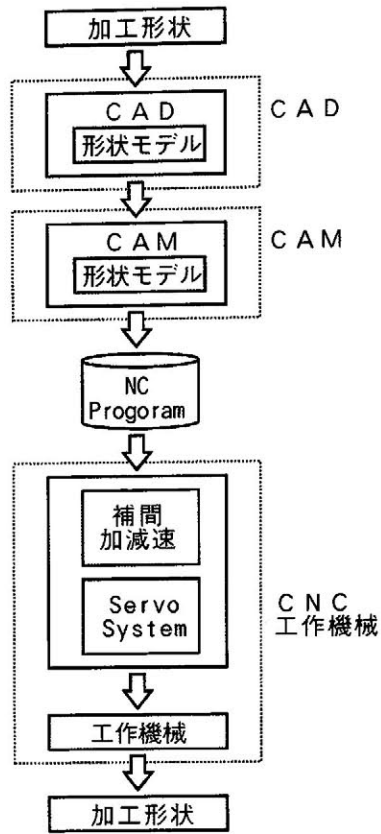


図 7. 3 現在の加工システムの構成図

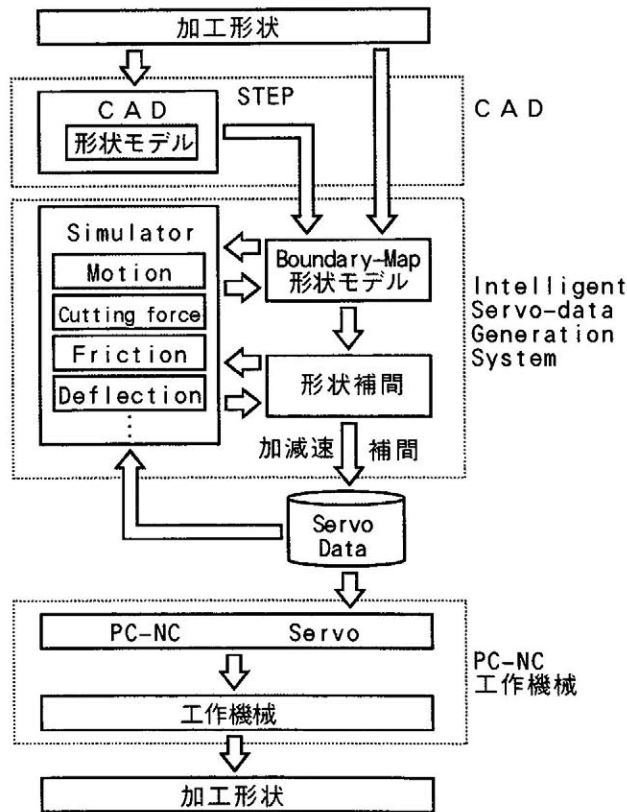


図 7. 4 Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムの構成図

期および特性を示すパラメータにより補間,加減速処理を行いサーボデータとして出力する。その後,出力されたサーボデータに基づき,運動誤差や工作機械の熱変形,切削力より工具のたわみや摩耗をシミュレーションし,その結果に基づいて再度形状補間部を通して補正処理を行い,要求される誤差範囲内に収まるサーボデータとなるまで補正を繰り返す。そして,最終的にはサーボデータとしてファイルに保存する。この保存されたサーボデータは必要なときに,PC-NCを付加した工作機械にネットワークを介して転送され,高速高精度な加工を行う。

近年のネットワーク転送速度の向上により,今後は,ISGSとPC-NC工作機械はネットワークを介してリアルタイムで直接PC-NC工作機械へのサーボデータの転送が可能であると考えられる。このことは,同じ特性を持った機械を複数用意することにより,同一データで,同じ形状を同時に加工することを可能にする。また,図7.5に示すように,ネットワーク(インターネット)を介して世界中にある工場の工作機械とリンクしておくことにより,空いた時間に,空いた機械に対してサーボデータを生成および転送し,効率よく高速高精度加工を行うことが可能となると考えられる。

また従来,高速高精度なCNC工作機械は一度購入すると,CNC装置や工作機械の機能が向上しても,高価であるため安易に新しいCNC装置や工作機械に交換することは困難であった。さらに,CNC装置や工作機械の改良や取り替えにも多くの費用を必要とする。しかし,提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムでは,対象となる工作機械が変更されても,上位のISGSにおいて,加工に用いる機械の特性パラメータの変更のみで対応できる。また,新たな制御手法あるいは,高精度な物理現象のモデルが提案された場合は,上位のISGSでの制御モデルあるいはシミュレーションモデルを変更するだけで対応可能となり,安価で常に最新の高速高精度加工が実現可能である。さらに,現在使用しているCNC工作機械に対してもサーボデータのインターフェイスを用意することにより,高速高精度加工が実現可能となり,レトロフィットにも適していると考えられる。

一方,物理的な要因を正確に補正するには,それぞれの現象を精度よくモデル化する必要がある。これらに関しては,従来からさまざまな研究がなされている。送り駆動系に関

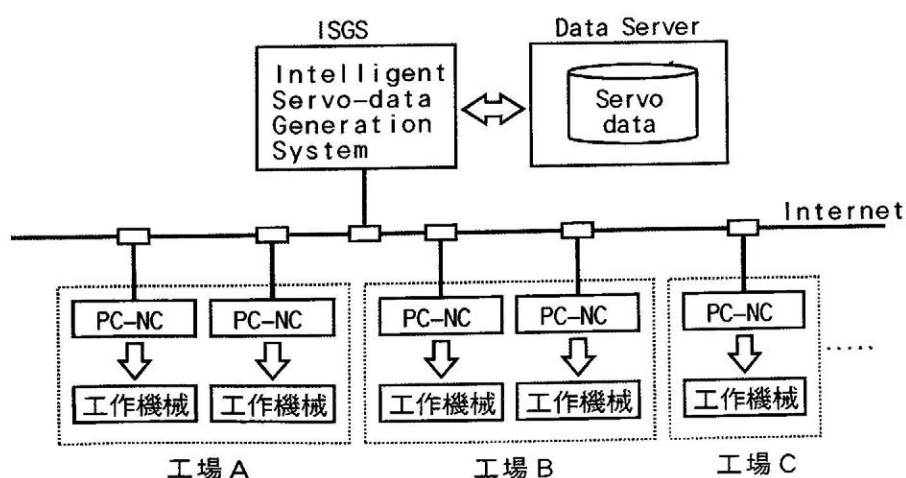


図7.5 ネットワークを利用した加工システムの構成

しては、加工における複数の層である、制御系、送り駆動系、摩擦系を1自由度から3自由度のモデル化し、モデルの精度を向上させる手法や^[169]、送り駆動系への摩擦モデルを組み込む手法^[170]が研究されている。また、工作機械の構成要素をモデル化し、形状創成運動の幾何学的誤差要因を推定する研究も行われている^[171]。さらに、工具の加工中における振動や、変形などに関しても、モデル化が進められている^[172]。このような研究により、精度の良いモデルが構築された場合も、モデルの変更だけで補正精度を向上させることが可能となる。また、PC-NC装置が高速化され、サンプリング周期が向上された場合も、システムのサンプリング周期を変更するだけで新しいPC-NC装置に対応可能である。

提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムは、補正精度を向上させるために、リアルタイムでの補正処理を前提としていない。現在の加工システムでは加工中におけるすべての現象をリアルタイムで補正することは困難であると考えられるからである。本研究では、リアルタイムに無理に補正を行い不十分な補正を行うより、事前に時間をかけて高速で精度の高い加工を実現しようとしている。

また、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムでは、出力をサーボデータとしたことにより、従来のNCプログラムに対してデータ量は膨大となる。しかし、現在のハードディスクは数十ギガバイトが主流となりつつあり、今後もさらにギガバイト当たりの単価は下がることが考えられるため、データ量が大きくなって問題にはならないと考えられる。また、データの圧縮技術も向上しており、データ量の削減に貢献すると考えられる。さらに、この膨大なデータの通信速度の問題は、コンピュータ間の転送速度は従来のシリアル通信の19200bpsからLANを用いた100Mbps以上に移行していることから、その転送速度はさらに向上すると予想され、十分実用範囲にあると考えられる。

7. 3 Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの試作

Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを用いて、運動誤差を補正するため、本章では図7. 4に示した提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムとして、ISGS部において形状補間処理と運動誤差シミュレーションと補正機能を開発した。さらにPC-NCを用いて、サーボデータを受け取り、サーボアンプに転送してモータを駆動するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの試作システムを構築した。試作システムの構成図を図7. 6に示す。試作システムでは、従来のCNC装置の動作と比較するために、CNC装置の補間、加減速処理をシミュレーションして、NCプログラムからサーボデータを生成する機能を付加した。

評価システムでは、加工形状をBoundary-Map形状モデルに変換し、サーボデータを直接生成する形状補間部と、サーボデータから運動誤差をシミュレーションし、サーボデータを補正するISGS部とPC-NCから構成されている。試作システムのパソコンNCを用いたPC-NC工作機械の構成を図7. 7 (a)に、試作システムの写真を図7. 7 (b)に示す。写真の右側のパソコンはISGSシステムとパソコンNCを含む試作システムで、左側のパソコンによって指令値や、サーボモータのエンコーダフィードバックを取り込み軌跡を測定している。パソコンNCには株式会社唐津鐵工所のPC-Mate^[173]

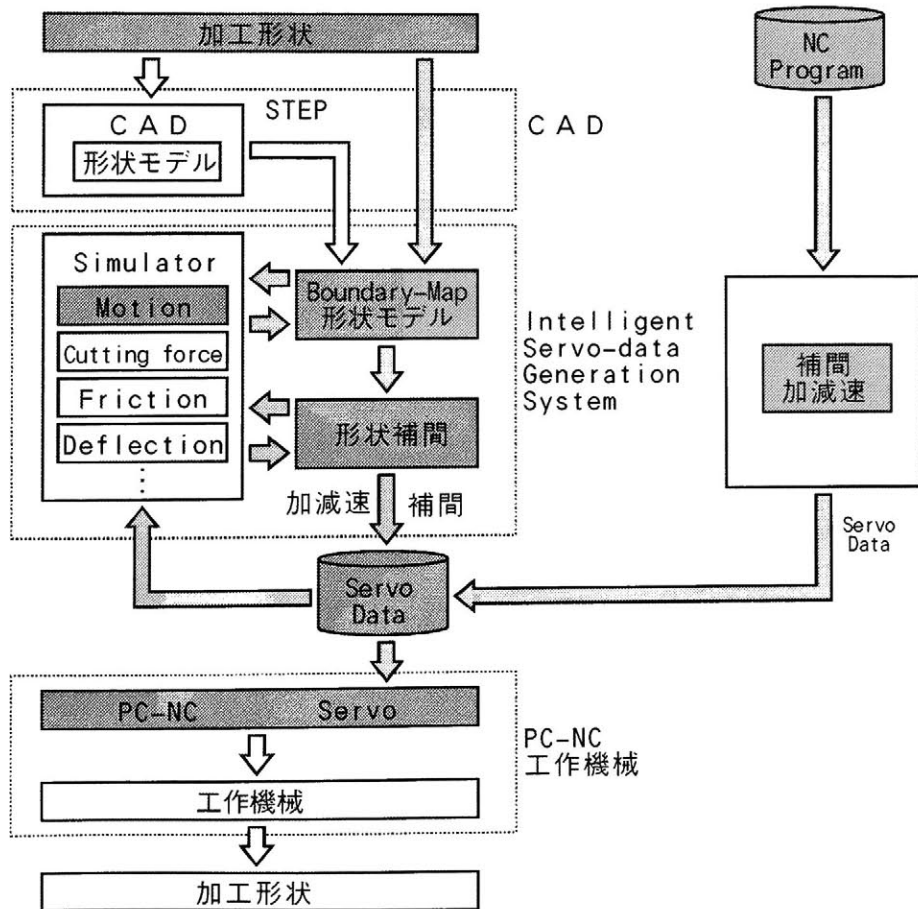
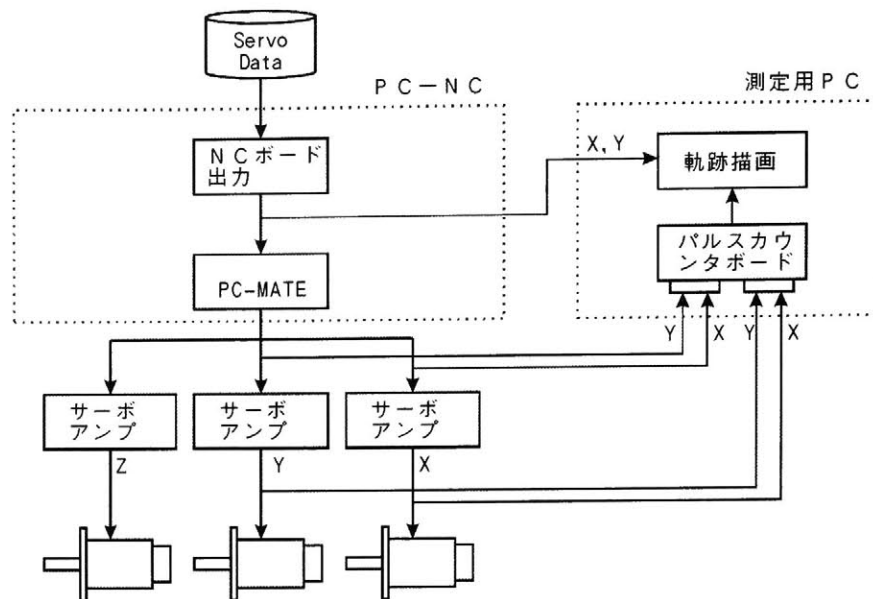
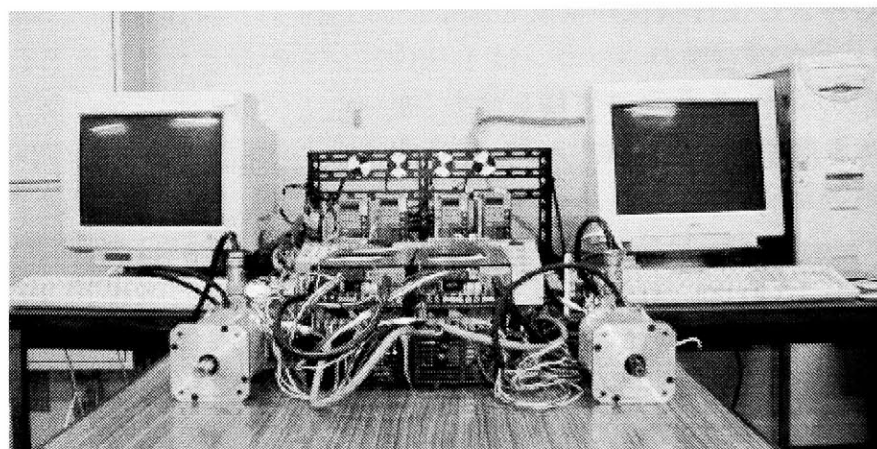


図7. 6 Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの試作システム



(a) 試作システム構成図



(b) 試作システムの全体写真

図7. 7 試作システムのPC-NC工作機械の構成

を用いて同時4軸制御を行っている。パソコンNCは、指定されたサーボデータファイルを開き、設定されたサーボサンプリング周期で、サーボアンプにサーボデータを転送しているのみで、補間や加減速処理は行っていない。サーボアンプおよびサーボモータは株式会社東栄電機^[174]のACサーボモータ100Wを用いている。なお、サーボアンプは、比例制御のみで制御されておりフィードフォワード等の高精度処理は行っていない。

パソコンNCの補間及びサーボサンプリング周期は40msと1msとして測定を行った。補間周期40msは、現在のCNC装置と比較して大きい数字であるが、大きな運動誤差を発生させるために補間周期を大きくしている。補間周期1msは、最新の高速高精度工作機械用のCNC装置で実現されている補間周期である。なお、サーボモータは無負荷で測定を行った。さらに、軌跡測定用にパソコンNCに入力されるパルスと、サーボモータからのフィードバック信号をカウンタボードを用いて測定した。

7. 4 形状補間

7. 4. 1 形状補間の概念

加工対象形状から直接サーボデータを出力する形状補間を実現するには、従来のCAMシステムで行われていた工具経路生成処理において、トレランスにより求めていたブロックの長さをサーボサンプリング周期当たりの長さに変更すると共に、次点までの長さを加減速処理に伴って可変する必要がある。また、次点の長さはトレランスにより決めるのではなく、現在の移動速度と各軸の最大加速度により決定する。

図7. 8は形状補間における加速処理の概念を示している。工具位置の次点探索には加工対象形状のオフセット形状から次点を探索する手法と、加工対象形状と工具が接する位置を求めて算出する手法がある。形状補間の場合にはどちらの手法も利用できるが、図7. 8では説明を簡単にするために、2次元でオフセット形状から次点を探索する手法について述べる。

加速中の現在点 P_n において、現在の速度 F_n （サーボサンプリング周期当たりの移動量）で移動している場合の形状補間における次点探索法を示す。等速で移動する場合の次点は、現在点 P_n を中心とした半径 F_n の円とオフセット面の交点となる。しかし、 F_n が指令速度 F_{max} より低い場合は、さらに加速しながら次点を探索しなければならない。ここで、各軸において現在の速度から加速及び減速できる範囲は、現在の速度の軸成分に対して、各軸の最大加速度を足し合わせた速度となる。すなわち、X軸における次点の速度は F_n のX軸成分 F_{nx} に対し、最大加速度 ΔF_x を足した速度 $F_{nx} \pm \Delta F_x$ となる。同様にY軸において次点の速度は $F_{ny} \pm \Delta F_y$ となる。これらの結果より、現在の

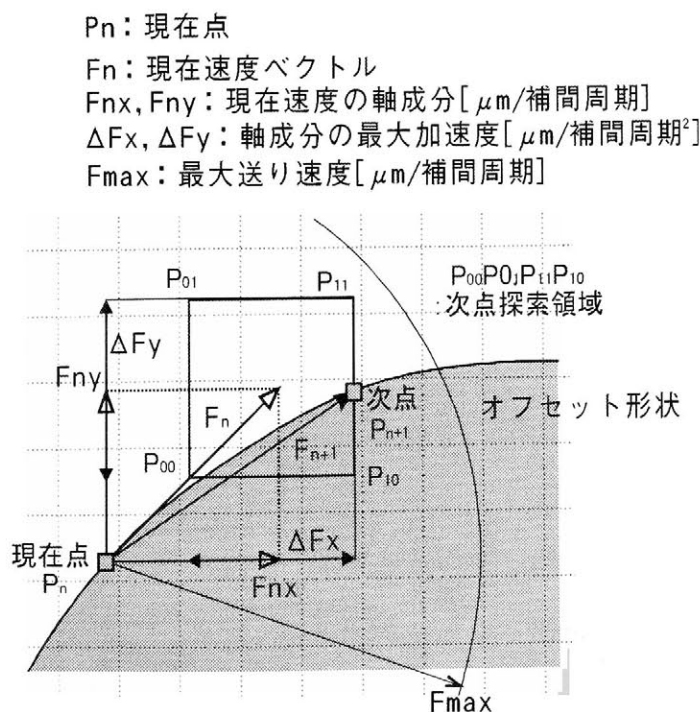
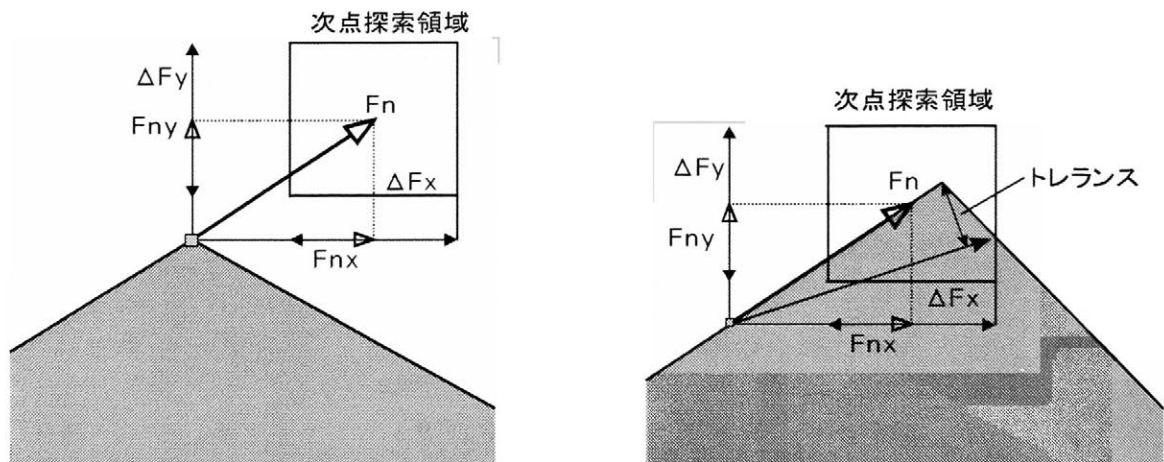


図7. 8 形状補間の加速処理

速度 F_n から次点の位置は矩形 $P_{00}-P_{01}-P_{11}-P_{10}$ (次点探索領域) の範囲内にある必要があり, 図 7. 8 の場合は P_{n+1} が次点となる. また, 次点探索において速度が指令速度 F_{max} を越えた場合は, 速度を F_{max} とした円弧とオフセット面との交点を次点とする.

しかし, 図 7. 9 (a) に示すように, 次点探索領域内に次点が見つからない場合, 現在の位置で曲ることができる最大の加速度を用いてコーナ速度を求める. そして, 現在の位置から進行方向と逆方向に加速していき, 以前計算した位置までの速度パターンと整合するように速度を調節する. また, 図 7. 9 (b) に示すように, 次点と形状とのトレランスが設定値より大きくなった場合は, トレランスを満たす点を次点探索領域のオフセット形状面から求める. 次点が見つからない場合は, 次点が見つからない場合と同様にコーナ減速速度を求めて加減速パターンを生成する.

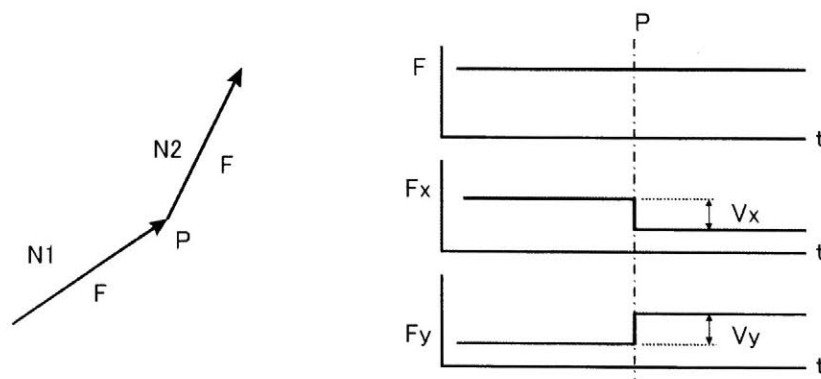
コーナ減速速度はサーボサンプリング周期毎の移動速度(サーボサンプリング周期当たりの移動量)の各軸方向の速度変化より求める. 図 7. 10 (a) に示すように進行方向の指令速度 F で移動中のサーボサンプリング周期当たりの移動軌跡が $N1$ から $N2$ に変化した場合を例に示す. この時, 角部の P 点における速度変化は図 7. 10 (b) に示すよ



(a) 次点が見つからない場合

(b) トレランスが大きい場合

図 7. 9 コーナ減速処理が必要となる条件



(a) サーボサンプリング周期での移動

(b) 速度変化

図 7. 10 コーナ減速速度

うになり、各軸の速度変化 V_x と V_y を求める。そして、(7-1) 式に示すように、サーボシステムおよび工作機械の特性から求めた許容最大加速度 V_{max} との比率である減速比の中から、最大比 R_{max} を求める。

$$R_{max} = \max \left(\frac{V_x}{V_{max}}, \frac{V_y}{V_{max}}, \frac{V_z}{V_{max}} \right) \quad (7-1)$$

求めた最大比を用いて、コーナ減速の速度は、(7-2) 式に示す値となる^[175]。

$$F_c = \frac{F}{R_{max}} \quad (7-2)$$

なお、本章では生成する工具経路を等高線工具経路に、使用工具をフラットエンドミルに限定して形状補間の処理を行った。

7. 4. 2 形状補間の出力結果

提案する形状補間の概念を用いて実際にサーボサンプリング周期当たりの工具経路が生成できるかを確認するため、簡単な形状に対して形状補間を行い、工具経路を作成した。

まず、速度変化の少ない滑らかな形状として図 7. 1 1 に示す長径 8 mm、短径 5 mm の楕円中に対して、半径 1 mm のフラットエンドミルを用いて等高線工具経路での形状補間を行った。サーボサンプリング周期、加速度等の条件を表 7. 1 に示す。送り速度を 3000, 6000mm/min に変えて、加減速の状態を比較した結果について図 7. 1 2 に示す。図 7. 1 2 は進行方向の速度と、X, Y 軸成分の送り速度を示している。

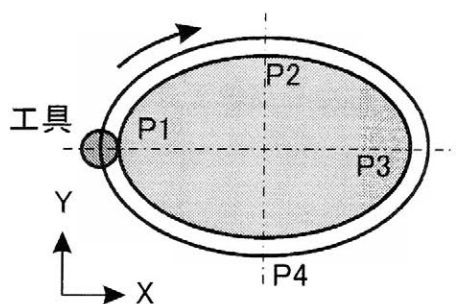
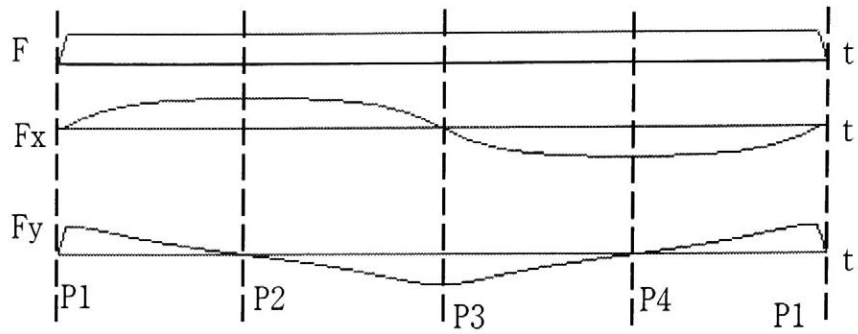


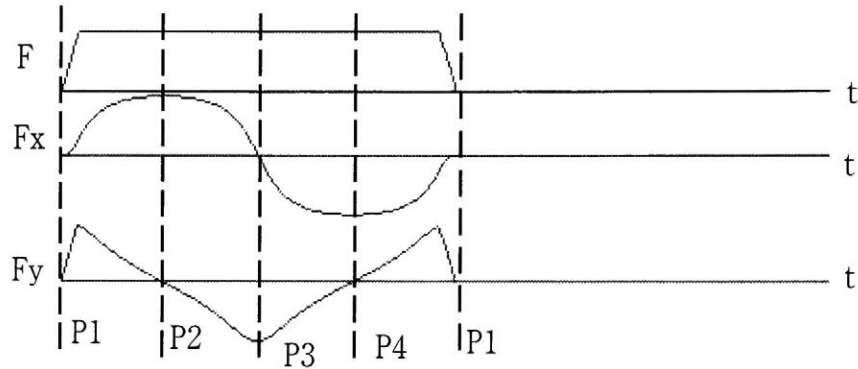
図 7. 1 1 工具経路生成対象の楕円柱

表 7. 1 工具経路生成条件

サーボサンプリング周期	1ms
各軸最大加速度	$50 \mu / ms^2$
Boundary-Map 格子間隔	$100 \mu m$
工具直径	1mm
トレランス	$25 \mu m$



(a) 送り速度 3000mm/min



(b) 送り速度 6000mm/min

図 7. 1 2 楕円柱に対する工具経路生成結果

同図より楕円については、進行方向の速度 F は一定であることより、移動途中で減速することなく、始点終点のみで加減速処理を行っていることがわかる。

次に、加減速処理が正常に実行されているかを確認するため、図 7. 1 3 に示す直方体について等高線工具経路を生成した。加工対象の直方体は一辺 8 mm であり、その他の加工条件は表 7. 1 と同じである。

図 7. 1 4 は、直方体に対して生成した等高線工具経路であるサーボデータの速度変化を示している。図 7. 1 4 (a) より、速度が 3000mm/min と低い場合には、角の部分で

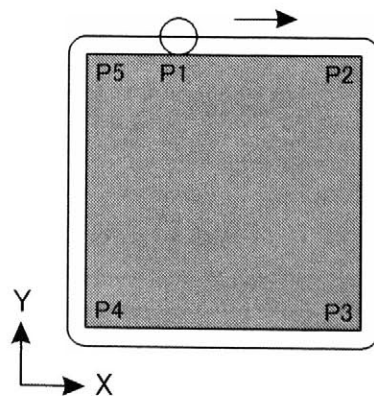
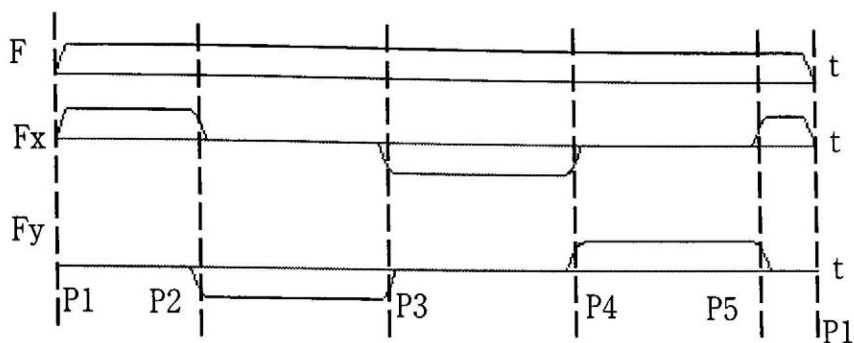
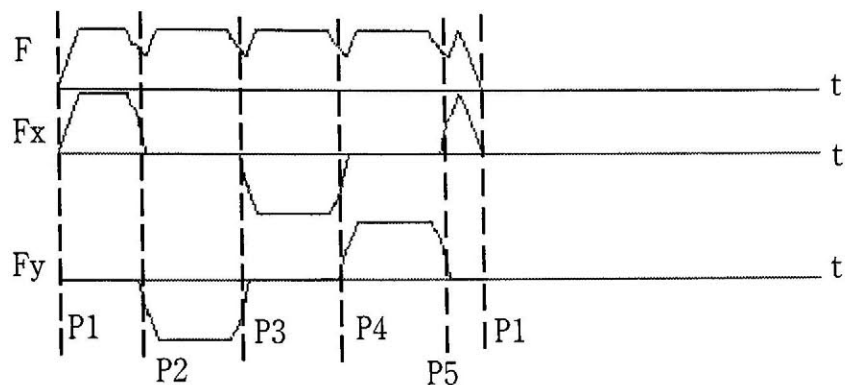


図 7. 1 3 工具経路生成対象の直方体



(a) 送り速度 3000mm/min



(b) 送り速度 6000mm/min

図 7. 1 4 直方体に対する工具経路生成結果

減速していないことがわかる。一方、図 7. 1 3 (b) に示すように、送り速度が 6000mm/min になるとトレランス量を超えるため、減速処理が実行されていることがわかる。

これらの結果から、提案する手法に基づいた形状補間により、形状に対して加減速処理が行われていることがわかる。

7. 5 形状補間とサーボデータによる運動誤差補正

7. 5. 1 運動誤差の補正

NCプログラムに基づいて、CNC装置の内部で行われている補間、加減速処理そしてサーボ処理をシミュレーションすることにより、運動誤差を再現できることは、第6章で述べた。また、NC加工シミュレーションが高精度に実行できることも第6章で確認している。本章では、指令値の軌跡とNC加工シミュレーションの結果の軌跡を比較することにより、指令値の軌跡を補正する手法について述べる。

本研究で提案している、Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにおいて、誤差はすべてサーボ指令値に対して補正することを提案している。そこで、運動誤差を補正するには図7.15に示すように、シミュレーションにより得られたあるサンプリング時間 t_i でのサーボデータのシミュレーション後の位置 P_r と、同じサンプリング時間 t_i での指令位置 P_c を比較し、偏差 dx 、 dy を求める。そして、これを逆方向にオフセットさせた位置 P_s を、サンプリング時間 t_i における補正指令位置とする。この処理をすべてのサーボサンプリング周期当たりのサーボデータについて行うことにより、補正指令位置を求めて運動誤差を補正する。

提案する手法での補正は、工具の位置を制御することによって補正を行うため、位置に依存する運動誤差や熱変形、工具摩耗、ステイックモーションの補正は可能であるが、工具の変形や振動に対しては異なる補正手法を適用する必要がある。

補正したサーボデータを求めるには、図7.6に示すBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにおいて、加工形状と工具形状をBoundary-Map形状モデルで定義し、形状補間を行いサーボデータを生成する。そして得られた、サーボデータをNC加工シミュレーションのモーションシミュレーションに入力し、サーボ処理によって生じると予測される追従誤差を含む軌跡を生成する。そして、サーボデータと予測される軌跡について各サンプリング周期における座標に対して誤差を求めると共に、誤差を指令値に足し合わせた軌跡を補正サーボデータとする。

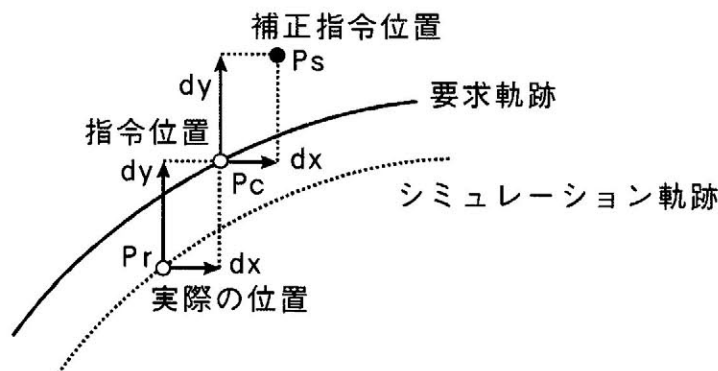


図7.15 運動誤差の補正概念

7. 5. 2 運動誤差補正の結果

Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムに対する運動誤差補正手法を検証するため図7. 6に示す評価システムを用いて検証を行った。補正の対象として、運動誤差が円弧半径減少として顕著に現れる円弧指令を用いた。

提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムでは、オフラインで補間と加減速処理を行い、サーボデータを生成してモータを駆動する。検証に当たり、オフラインで求めたサーボデータを基に実際に試作システムにおけるPC-NCからモータを駆動できるか確認するため、NCプログラムに基づいてオフラインで補間と加減速処理を行い、得られたサーボデータにより、実際にPC-NCを駆動してPC-NCのモータのフィードバック信号より移動軌跡を測定した。また、測定した移動軌跡から円弧半径減少量を求め、リアルタイムで補間、加減速している従来のCNC装置と同様の円弧半径減少量が生じているか確認した。

図7. 16は、半径100mmの円弧に対して、送り速度10000mm/minでサーボデータを生成し、PC-NCによりモータを駆動させた時のモータの移動軌跡を測定した結果である。加減速パターンは指数加減速であり、加減速時定数と位置ループ時定数を40, 80, 120msと変化させた。また、得られた軌跡の円弧半径減少量を理論値と比較した結果を表7. 2に示す。

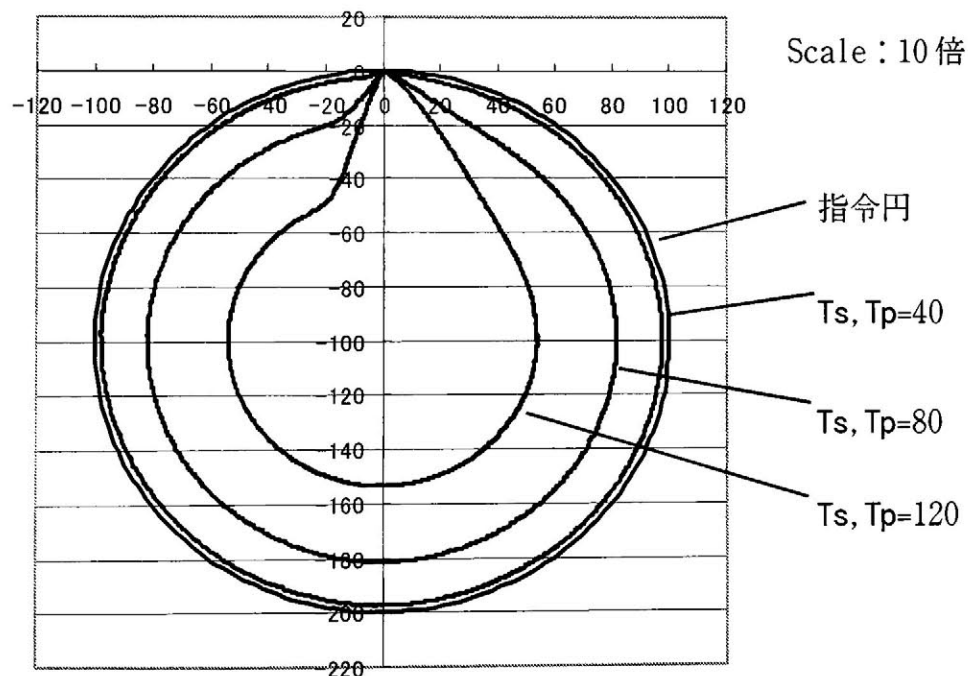


図7. 16 サーボデータによるPC-NCのモータ駆動軌跡

表 7. 2 測定した円弧半径減少量

時定数 Tp, Ts[ms]	円弧半径減少量	
	理論値[mm]	測定値[mm]
40	0.444	0.2365
80	1.777	1.4952
120	4.000	3.4965

図 7. 16 の結果より、指令円弧に対して円弧半径減少量が生じることがわかると共に、時定数の増加に伴い円弧半径減少量が増加していることがわかる。また、表 7. 2 より、発生する運動誤差量が理論値と比べて約 0.2～0.5mm の差があるが、生じる運動誤差に比べて小さく、理論値に近いことがわかる。これらのことより、オフラインで求めたサーボデータを用いてサーボモータを駆動しても、リアルタイムでサーボモータを駆動しても出力する軌跡に差がないことがわかる。

ここで、時定数が 40ms の場合に誤差量が半分である原因は、PC-NC の補間周期が 40ms であるため、加減速処理が機能していないことによると考えられる。また、誤差が生じる原因として、補間周期 40ms に対して、サーボアンプ内部のサーボサンプリング周期が短いことが考えられる。

次に、提案する Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムの運動誤差補正処理により、運動誤差を補正できるかを確認するため、半径 100mm、送り速度 10000mm/

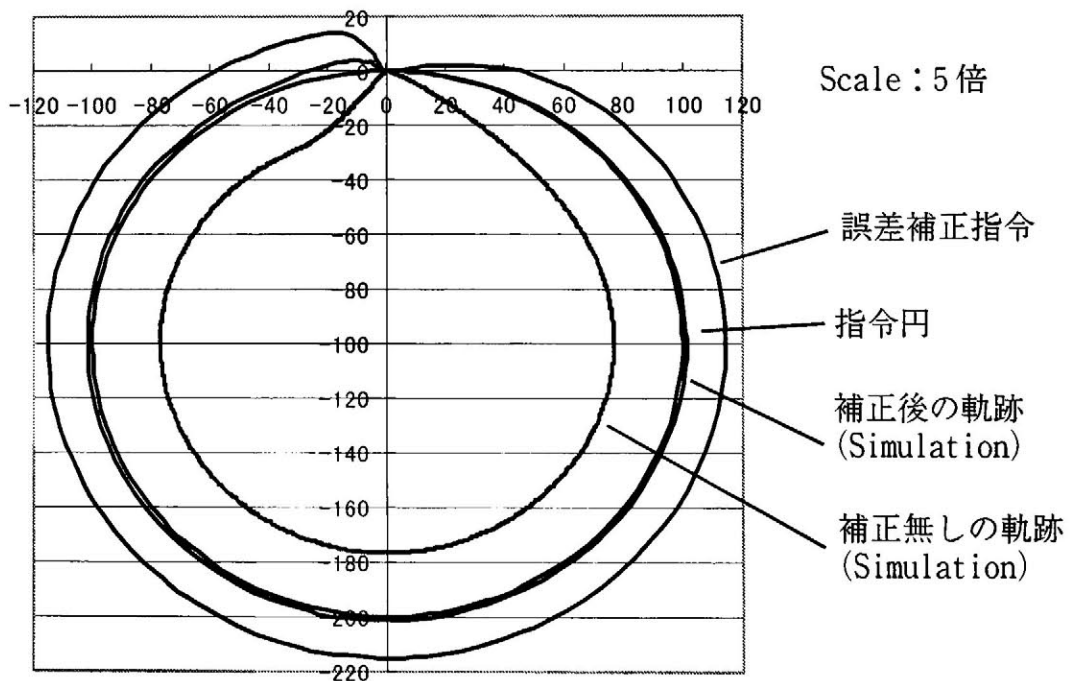


図 7. 17 運動誤差補正シミュレーション結果

min, 加減速, 位置ループ時定数 120ms の円弧指令を対象に評価を行った。

図 7. 17 は, 形状補間を行ったサーボデータに対して補正を行った補正指令サーボデータと, この補正指令サーボデータを PC-NC に出力した場合の円弧軌跡をシミュレーションした結果を示している。また, 比較のため, 従来の CNC 装置の処理で生じる円弧軌跡を示している。

同図より, 指令円弧に対して補正を行わない場合は運動誤差量が発生し, 軌跡が内側に入っていることがわかる。提案する手法で, 円弧半径現象を生じた軌跡と, 指令軌跡の差により誤差補正を行った軌跡は, 指令円弧より大きな円弧となることがわかる。そして, この値を PC-NC に与えたときのサーボモータの軌跡をシミュレーションした結果, 指令円弧に近い軌跡がシミュレーションできていることがわかる。これらのことより, 提案する補正手法を用いて円弧半径減少量を予測して補正した補正指令サーボデータを生成することができ, シミュレーションにより円弧半径減少量を低減することができることがわかった。

次に, 提案する手法によって誤差補正が実際に試作システムを通して実現できるかを確認するため, 求めた補正指令を PC-NC に与えてサーボモータを駆動させ, モータのエンコーダフィードバックから実際のモータの軌跡を測定した。

図 7. 18 は, 得られた補正指令サーボデータを実際に PC-NC に入力して, モータを駆動させて軌跡を測定した結果である。条件は, 図 7. 17 と同じで, 半径 100mm の円弧を送り速度 10000mm/min, 加減速, 位置ループ時定数 120ms, 補間周期 40ms で円弧指令を行ったときのサーボモータの軌跡を測定した。

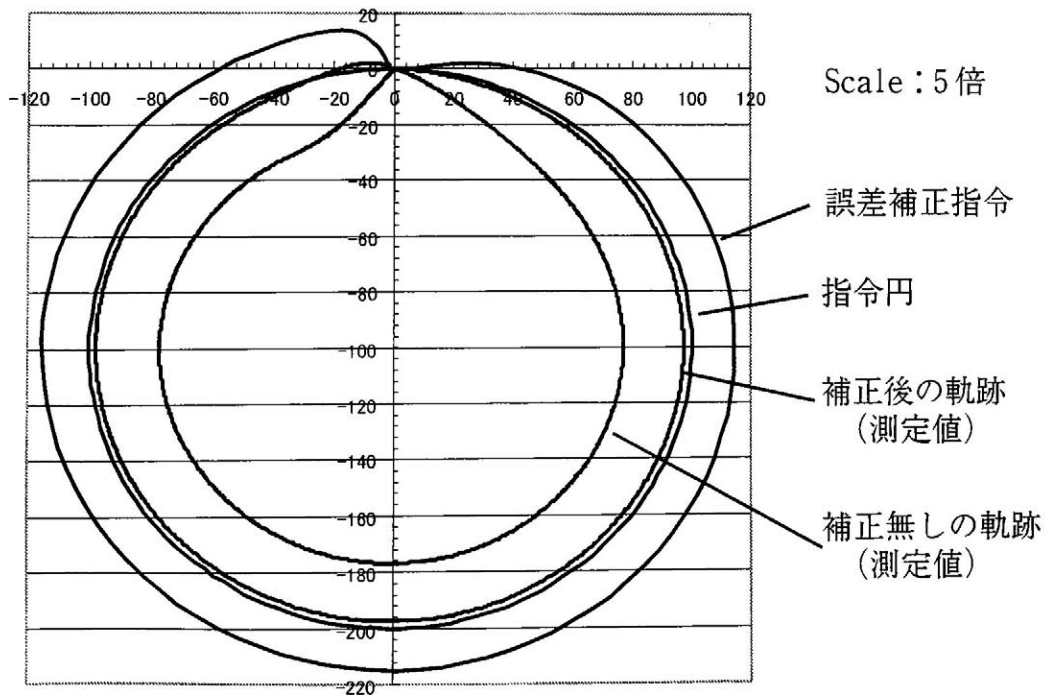


図 7. 18 運動誤差補正後のモータ軌跡の測定結果

指令円弧に対して、補正を行わない場合は、モータの軌跡は円弧半径減少により内側に入っていることがわかる。一方、図に示す誤差補正指令を与えた場合は、図の補正後の軌跡に示すように、モータの軌跡は指令円弧に近いことがわかる。

表 7. 3 補正による円弧半径減少量

理論値	シミュレーション値[mm]		測定値[mm]	
	補正無し	補正有り	補正無し	補正有り
4.000	3.8154	0.5532	4.6479	0.8900

表 7. 3 は、シミュレーションおよび補正後のサーボモータの軌跡から円弧半径減少量を測定した結果を示している。

この表より、補正によってシミュレーションで約 14 %、実際の軌跡測定で約 22 % に運動誤差を低減できていることがわかる。評価したサンプル数は少ないが、これらのことから、NC加工シミュレーションにより誤差を予測し、得られた誤差量をサーボデータに対して補正することにより、実際の駆動軌跡を指令円弧に近づけることが可能となる。

また、図 7. 19 は、高速高精度加工機を想定し、補間周期 1 ms で円弧半径 100mm の円弧に対して送り速度 2000mm/min、位置ループ時定数 T s、加減速時定数 T s を 30ms に設定して補正を行った結果を示している。設定した条件での円弧半径減少量の理論値は 5 μ m である。同図よりシミュレーションにおいては誤差量をなくすことができているが、実際にサーボモータを駆動して測定すると、モータのリップルが $\pm 5 \mu$ m 存在することにより、誤差を完全になくせないことがわかる。しかし、この結果より、円弧半径減少量が

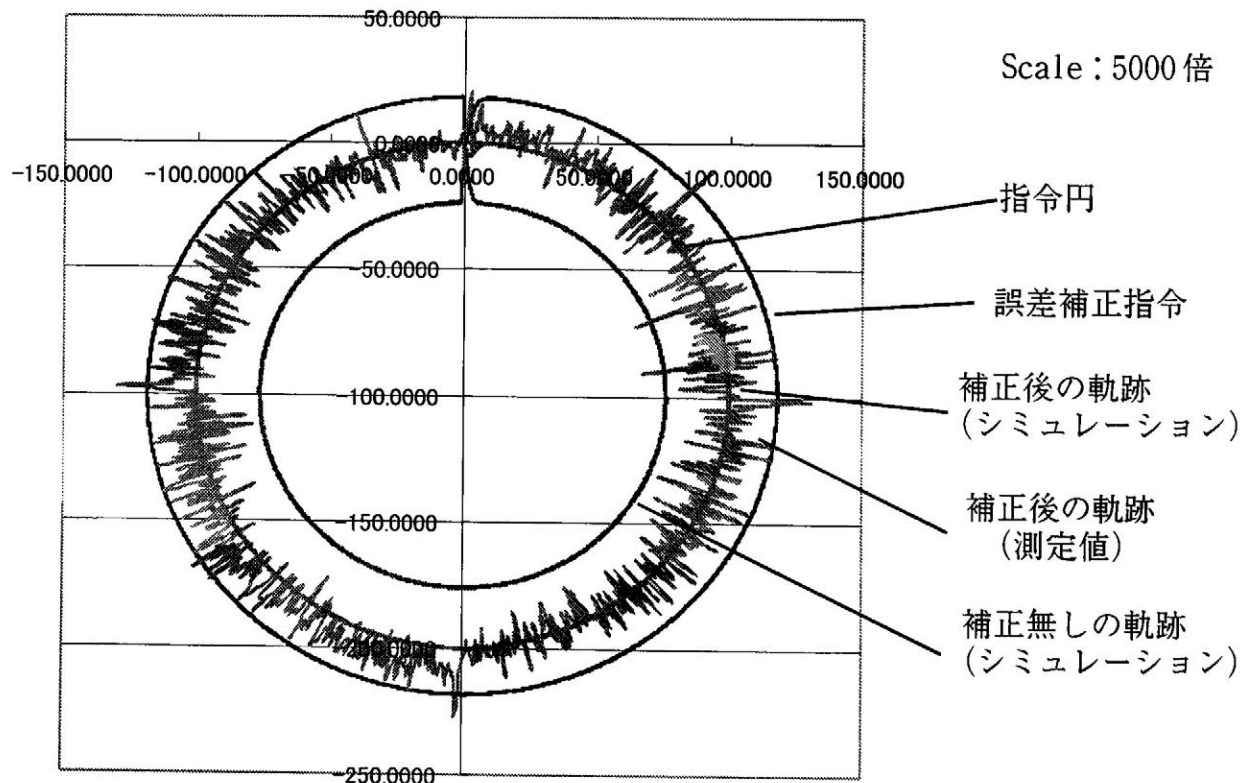


図 7. 19 運動誤差補正後のモータ軌跡の測定結果

5 μm の誤差においても提案する手法により誤差を低減できることがわかる。

以上の結果より、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムによって運動誤差を低減することができることが明らかになった。

7. 6 総括と結論

第7章では、現状の高速高精度加工システムにおける情報の流れを整理すると共に、現状の補正手法について述べた。そして、高速高精度加工を実現するひとつの手法として、Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを提案した。提案するシステムは、形状から直接に加減速と補間処理を行いサーボサンプリング周期での位置データであるサーボデータを出力する形状補間により、指令精度を向上させる手法である。また同時に、求めたサーボデータを用いてNC加工シミュレーションを行い、加工中に生じる誤差を予測してサーボデータに補正量を付加することにより誤差を補正し、高精度加工を実現する手法である。

そして、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの有効性を確認するため、誤差に対する補正を運動誤差に限定し、運動誤差補正の機能を付加したBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの試作を行った。試作システムは大別して形状補間処理、モーション補正処理、PC-NCから構成される。

試作したBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにより、運動誤差を補正できるかを確認するために、円弧指令に対して補正処理を行い、モータ単体での軌跡を測定し、補正の効果を検証した。

これらの結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 工作機械への最終的な指令値がサーボサンプリング周期当たりの位置指令であることに着目し、形状から直接サーボデータを生成する形状補間を提案した。そして、簡単な形状に対して、形状補間を行い、形状補間により指令軌道が生成できることを確認した。
- (2) NC加工シミュレーションにより得た誤差量を補正してサーボデータに反映させる手法を提案した。そして、提案する補正手法を運動誤差の補正に応用し、NC加工シミュレーションにより得た誤差を補正する手法を開発した。
- (3) Boundary-Map形状モデルに基づいて、形状補間より得たサーボデータとサーボデータに対する誤差補正手法を組み合わせ、高精度加工を目指すBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムの試作システムを構築した。そして、試作システムにより、オフラインで求めたサーボデータを利用してモータを駆動できることを確認した。
- (4) 試作したBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを用いて、円弧指令に対する円弧半径減少について適応した。その結果、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにより円弧半径減少量が低減できることを確認した。

これらの結果より、提案するBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムにより高精度な加工を実現できる可能性が明らかになった。この手法は運動誤差補正だけではなく、工作機械のステックモーションや熱変形、工具の摩耗にも同じ手法で適用できると考えられる。運動誤差以外の誤差補正についての、補正手法の確立と、PC-NC工作機械による実際の加工実験を通しての評価が今後の課題となると考えられる。

最後に、本研究を通して、開発した Boundary-Map 形状モデルは従来の形状モデルに比べ、CAMシステムにおいて高速な工具経路が生成できるだけでなく、NC加工シミュレーションや、形状補間など加工システムに幅広く利用できる形状モデルであることが明らかになった。

参考文献

- [169]大友, 堤, 山崎ほか: CNC工作機械の送り駆動系の数学モデル (高精度マシニングセンタの開発), 1994年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.33
- [170]堤, 大友, 山崎ほか: 摩擦を考慮したCNC工作機械送り駆動機構の数学モデル, 精密工学会誌, Vol.61, 第10(1995), pp.1458-1462
- [171]春本玲子, 稲崎一郎: 形状創成関数理論による工作機械の誤差解析, 精密工学会誌, Vol.59, 第6巻(1993), pp.915-920
- [172]S. Smith and J. Tlustý: An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process, Trans. ASME. J. Eng. Ind., 113, 2(1991), pp.169
- [173]株式会社唐津鐵工所: NC MATE-4V取扱説明書 Ver2.0, (1998)
- [174]東栄電機株式会社: B S サーボアンプ VLASE 取扱説明書, (1991)
- [175]FANUC株式会社, FANUC Series16 取扱説明書, (1998), pp.105

第 8 章

結 論

本論文は、加工形状に対する要求精度が現在の数十 μm から数 μm になりつつある加工システムにおいて、さらなる高速高精度加工を実現するために問題となる事柄を整理し、その対策について検討を行った結果について述べている。

本論文では、高速高精度加工の定義を、高速送りによる高精度な加工に限定せず、高速な工具経路生成、高能率な工具経路生成、高速高精度なNC加工シミュレーションまでを含めた、加工システム全体の効率化を含めて高速高精度加工と定義している。特に、現状の高速高精度加工システムにおいては、工具経路の生成時間と工具経路の検証が加工工程全体のボトルネックとなる傾向があり、これらの処理を高速に行うことが加工システム全体の効率化に有効である。また、CAMシステムからNC加工シミュレーションまでの処理を統一した形状モデルで処理することにより、加工状態の情報がCAMシステムにフィードバックされ、加工精度の向上に役立つと考えられる。

そこで、本研究では工具経路生成からNC加工シミュレーションまでを統一したデータ構造で処理できる形状モデルとしてBoundary-Map形状モデルを提案し、その有用性を確認した。そして、提案する形状モデルがCAD/CAMシステムの基本的な機能を満たすことができるかを確認するため、CADシステムの基本機能である形状定義、編集、表示処理を行った。また、CAMシステムの基本機能として等高線工具経路と走査線工具経路を生成する手法を提案し、工具経路生成処理時間の測定を行い、処理速度の検証を行った。

さらに、Boundary-Map形状モデルのデータ構造が加工領域の判定に有効であることから、高速加工において問題となる工具への負荷変動を抑えると共に、高速送りが可能な直線に基づく工具経路を生成する手法を提案し、汎用のCAMシステムと比較を行った。

一方、Boundary-Map形状モデルを用いて高速にNC加工シミュレーションを行う手法を提案し、市販のNC加工シミュレーションと精度、処理時間について比較した。また、NC加工シミュレーションにおいて、加工の要求精度が数 μm になった場合に考慮する必要がある、工作機械の運動誤差や工具のたわみなどをシミュレーションし、NC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を提案した。

さらに、高速高精度な加工を実現するために、形状データから直接、サーボモータを駆動するサーボデータを生成すると共に、NC加工シミュレーションにより得られた誤差を利用して誤差補正するサーボデータに基づく高速高精度加工システムを提案した。そして、提案するサーボデータに基づく高速高精度加工システムを試作し、運動誤差補正に対する補正の効果について検証を行った。

各章で得られた結論をまとめると以下のようなになる。

第1章では、本研究の位置づけを明確にするため、本研究における技術的背景を述べたのち、本研究の目的と本論文で取り組んだ内容について述べた。また、本論文の全体の構成と、各章の概要について構成と流れを説明した。

第2章では、現状の高速高精度加工における加工誤差要因と問題点に関する調査を、CAD/CAMシステム、CNC装置、工作機械について行った結果について述べた。また、さらなる高速高精度加工を効率よく行うために問題となる、現状の加工システムの問題点

と誤差の補正手法に関する問題点を提起した。

第2章で述べた問題点を解決し、高速高精度加工システムを実現するために、本研究では以下の内容について研究開発を行った。

- (1) CAD/CAMシステムからNC加工シミュレーションまで共通して利用できる形状モデルの開発。(第3章)
- (2) 加工システムにおける工具経路生成時間を短縮するために、工具経路を高速に生成できるCAD/CAMシステムの開発。(第4章)
- (3) 加工システムにおける加工時間を短縮するために、高速加工に対応した高能率な工具経路を生成する高能率な荒取り加工システムの開発。(第5章)
- (4) 加工システムにおける試し削り時間を短縮するために、高速で高精度なNC加工シミュレーションを実行できるNC加工シミュレーションの開発。また、運動誤差や工具のたわみをNC加工シミュレーション後の形状に反映できる高精度NC加工シミュレーションの開発。(第6章)
- (5) CAD/CAMにおける工具経路生成から工作機械を駆動するまでの情報の単位をサーボデータとすることにより、高精度な指令を生成すると共に、NC加工シミュレーションにより得られた誤差情報より、誤差をサーボデータ単位で補正するシステムの開発。(第7章)

第3章では、従来のCAMで用いられている形状モデルが形状表現精度の向上を目指しているため、高速な干渉チェックや工具経路の生成が困難であることを示した。また、高速高精度な加工システムを実現するために、パスの生成からNC加工シミュレーションまでを統一して扱える形状モデルの必要性について述べた。

そこで、空間格子モデルの特徴を生かすと共に、高精度な形状表現が可能であるBoundary-Map方式を新たに提案し、その概念とデータ構造を示した。そして、同じデータ形態を持つ空間格子モデルの代表的なVoxel方式と、形状を表現するのに必要な使用メモリ容量に関して比較を行った。また、空間格子の格子間隔と表現精度の関係を球と楕円体により算出した。さらに、データ容量を低減させる手法として、Boundary-Mapデータ構造にデータ圧縮の概念を適用し、圧縮の有無による使用メモリ容量の比較を行った。

これらの主な結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 空間格子モデルを基本にしたBoundary-Map形状モデルを新たに提案し、そのデータ構造を示した。Boundary-Map形状モデルにおいて、形状の表現にはXY, YZ, ZXの平面毎に、各格子のスキャンラインに対応したリストデータの先頭番地を格納する3つのスキャンライン2次元配列とこれらに対応したリストデータを格納するリストデータ用のヒープ領域を3つ用いることにより形状を表現している。このデータ表現方法を用いることにより、Z-Map方式に比べてオーバーハングを持つような形状であっても形状表現が可能となると共に、立ち壁における精度の劣化やオーバカットを防ぐことが可能となる。
- (2) 粗い格子間隔の空間に対して、楕円体形状をVoxel方式とBoundary-Map方式で表

現し、表現精度の視覚的な比較を行った。また、楕円体、球、円柱そして直方体を定義した場合の形状表現に必要なメモリ容量の比較を行った。その結果、格子間隔が同じであるなら、Boundary-Map方式はVoxel方式と比較して少ないメモリ容量で高精度に形状表現ができることを確認した。

- (3) 空間格子の格子間隔と形状の精度を調べるため、半径5mmの球と半径が5, 10mmの楕円体を定義し、Boundary-Map形状モデルの表現精度を測定した。その結果、半径5mmの球の場合、1 μ mの精度を得るには格子間隔を100 μ mにすることにより表現できることを確認した。この結果より、Boundary-Map形状モデルを用いることにより、要求精度より大きな格子間隔でも、精度良く形状を表現できることが明らかになった。
- (4) Boundary-Mapデータ構造にデータの圧縮を試みた結果、圧縮しない場合に比べて1/20～1/40程度に低減できることが明らかになった。また、圧縮率は形状の複雑さや姿勢に大きく影響を受けるが、形状の定義空間を小さくし、容積率を上げることがメモリ低減に有効であることを確認した。さらに、圧縮を行っても形状処理は全く同じアルゴリズムで処理できると共に、可逆性を持つことを確認した。

なお、Boundary-Mapデータ構造におけるデータ圧縮は、同一スキャンラインを示すリストデータを一つにまとめ、ポインタを共有することにより実現できる。

第4章では、CAMシステムに適したデータ構造を持つソリッドモデルとして新たに提案した空間格子法に基づいたBoundary-Map形状モデルを用いてCADシステムが構築できるかを確認するため、CADの基本機能である形状生成と編集についての機能開発を行い、Boundary-Map形状モデルに基づくCADシステムを開発した。

また、提案するBoundary-Map形状モデルを用いて、高速にそして高精度に工具経路を生成する手法について検討した。工具経路の生成手法には、加工中における工具の変形や異形工具、非回転工具、実時間加工に対応するため、オフセット法を用いず、接触法を用いて工具経路を生成した。Boundary-Map形状モデルに基づいて工具経路を生成する手法として、加工対象形状と工具とをBoundary-Map形状モデルで定義し、それぞれをワークフレームと工具フレームに設定した。そして、両フレーム内にある工具とワークの干渉チェックを行うことにより、工具を常に加工対象に接触するように移動させて生成される軌跡を工具経路とした。この手法を実現するため、Boundary-Map形状モデルにおける干渉チェック機能と、干渉状態から次点の接触点を探索する次点探索機能を開発した。そして、この機能を用いたCAMシステムを構築すると共に、等高線工具経路と走査線工具経路の生成に応用し、工具経路の生成時間を測定した。また、生成した工具経路に基づいて加工実験を行い、実際にCNC工作機械を用いて加工できるかの検証を行った。

これらの主な結果を要約すると以下のようなになる。

- (5) プリミティブとして、2次曲面と平面からなる円柱、直方体、球、円錐、三角柱の入力を可能とし、プリミティブ生成が2次曲面と平面の交点問題により実行できることを示した。また、NURBS曲面式から、Boundary-Map格子間隔に基づく微小三角形を生成することにより、NURBS曲面をBoundary-Map形状モデルに変換できる

ことを確認した。

- (6) Boundary-Map形状モデルで表現された形状間において、形状を表しているリスト毎の演算によりセットオペレーションが実行できることを確認した。また、NURBS曲面であっても、プリミティブ形状であっても、一度Boundary-Map形状モデルのデータに変換された後は、リスト毎の演算によりセットオペレーションが可能であることを確認した。さらに、スイープ処理が、スイープ軌跡を離散化した位置毎のセットオペレーションのOR処理によって実現できることを確認した。
- (7) Boundary-Map形状モデルの形状データから格子間隔単位の直方体 (Voxel) を抽出し、直方体から面を取り出して描画することにより、Boundary-Map形状が描画できることを確認した。
- (8) 工具経路生成手法として接触法をBoundary-Map形状モデルに適用し、干渉チェック機能と、次点探索機能により工具経路を生成するアルゴリズムを開発した。また、開発した工具経路生成アルゴリズムに基づき、等高線工具経路と走査線工具経路を生成するBoundary-Map形状モデルに基づくCAMシステムを構築した。生成した工具経路は、格子状にない位置においても接触点を算出できるため、精度良く工具経路が生成できることを確認した。
- (9) 開発した工具経路生成アルゴリズムを用いることにより、非回転工具、異形工具であっても、工具経路の生成が可能である。また、オーバハンクを持つ形状に対しても同一のアルゴリズムを用いて工具経路が生成できることを確認した。
- (10) 等高線工具経路と走査線工具経路において、干渉チェックを含めて次点を探索するのに要した平均時間は、CPUに400MHzのPentium IIを用いてそれぞれ14msと4msであり、CPUの高速化によってリアルタイムでの加工が可能となると考えられる。
- (11) 開発したCAMシステムにより生成された等高線工具経路と走査線工具経路により、実際に加工が行えることを確認した。
- (12) これらのことから、提案するBoundary-Map形状モデルは、CAD/CAMシステム用モデルと有効であることを確認した。

第5章では、高能率な荒取り加工を実現するため、等高線工具経路における高速送り時に、問題となる負荷変動を低減できるように、事前に穴加工を行う工具経路を生成する手法を提案すると共に、自動的に穴加工要の工具経路を生成するシステムを開発した。また、高能率な荒取り加工を実現するために、加工領域をできるだけ直線的な工具経路により加工できる工具経路を生成する手法を提案すると共に、Boundary-Map形状モデルを用いて自動的に生成するシステムを開発した。さらに、開発した二つの手法を用いて実際に加工できるかを確認するため、CNC工作機械を用いて実加工を行った。最後に、生成した工具経路がどの程度、高能率荒取り加工を実現できているかを確認するため、汎用のCAMシステムにおいて、一般的な加工法であるポケット加工とオフセット加工用工具経路を生成させ、開発した高能率荒取り加工システムが生成した工具経路と比較を行った。

これらの主な結果を要約すると以下のようなになる。

- (13) Boundary-Map形状モデルを用いて、形状急変部における事前穴加工用工具経路と、加工領域から直線を主体とした工具経路を生成することが可能であることを確認した。また、 x 、 y 、 z の各軸に平行な方向に対して形状の情報を持つBoundary-Mapデータは、長手方向切削における領域探索において高速な処理の実現に有効であることを確認した。
- (14) 等高線工具経路において事前に穴加工を行うことにより、形状急変部における除去体積の著しい増大を低減できることを確認した。除去体積の増大は工具に対する負荷の増大を意味するため、事前に穴加工を行うことにより、形状急変部での工具負荷を低減することができる。
- (15) 荒取り加工における工具経路を直線主体にする長手方向切削に基づく工具経路により、移動距離は増大するが、ブロック数の増大が無く、送り速度を上げることが可能であることを確認した。切削送り速度を上げることにより、さらに高速加工することができる。
- (16) 形状急変部における事前穴加工用工具経路と、加工領域を直線による工具経路を生成するシステムを開発し、生成された工具経路を用いて実際に加工が行えることを確認した。

第6章では、視点や画面サイズに関係なく、工具のたわみや熱変形などを含めて高速で高精度なNC加工シミュレーションが行える加工シミュレータの実現を目的に開発を行った。NC加工シミュレーションに用いる形状モデルには、第3章で提案したBoundary-Map形状モデルを用いた。そして、Boundary-Map形状モデルを用いた形状除去処理アルゴリズムとNCプログラムを補間・加減速して点群化する補間・加減速処理を開発し、両者を組み合わせて加工シミュレータを構成した。作成したNC加工シミュレーションシステムを用いて、加工現場で用いられたNCプログラムを用いてNC加工シミュレーションを実行すると共に、同時に形状除去における除去量の算出手法を開発し、エアカットの工具経路を削除する機能に適用した。さらに、開発したNC加工シミュレーションを汎用の加工シミュレータと処理速度、干渉チェックの精度に関して比較を行った。

そして、より高精度なNC加工シミュレーションを行うために、CNC工作機械工作機械で生じる運動誤差や切削中の工具のたわみなどを加工後の形状に反映させることができるNC加工シミュレーションを開発した。

これらの主な結果を要約すると以下のようなになる。

- (17) Boundary-Map形状モデルを用いて、形状除去と除去体積の算出が可能であることを確認した。また、NC加工シミュレーションに用いる工具は任意形状でもシミュレーションが可能で、シミュレーション対象とする形状はオーバハングを持つ形状でもシミュレーションができることを確認した。さらに、加工現場で用いられるNCプログラムを用いて、開発したNC加工シミュレーションシステムを実行した結果、開発したNC加工シミュレーションシステムが実用できるシステムであることを確認した。

- (18) 汎用のNC加工シミュレーションと比較することにより、Boundary-Map形状モデルを用いたNC加工シミュレーションは、シミュレーション後の精度を同じに保ちながら、ブロック数に関係なく一定時間で高速に処理できることを確認した。また、干渉チェックについては、汎用のNC加工シミュレーションと比較して高精度に実行できることを確認した。
- (19) 除去体積算出処理を利用して、エアカット経路について従来のように送り速度を上げたり、早送りにするなどの送り速度の制御のみを行わず、エアカット経路を削除し、直接工具経路自体を変更する手法を用い、加工距離の短縮化を図った。その結果、開発した手法を用いることにより、エアカットを含む工具経路が大幅に削除できることを確認した。
- (20) より高精度なNC加工シミュレーションを実現するため、工作機械の運動誤差を、NC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を開発した。開発した手法は、NCプログラムに基づいてCNC装置内部で行われる補間、加減速処理を模倣すると共に、サーボ処理のシミュレーションを行い、運動誤差を含んだ位置を求め、各位置において素材から工具形状を除去することにより実現している。この処理によってNC加工シミュレーション後の形状に運動誤差が反映できることを確認した。
- (21) 運動誤差を再現したNC加工シミュレーションの精度を検証するために、実際に加工実験を行い円弧半径減少量と加工形状について比較を行った。その結果、開発したNC加工シミュレーションは粗い格子間隔でも、ミクロン単位の運動誤差を精度良く再現すると共に、NCシミュレーション後の形状に、加工実験後と同じ運動誤差を再現できることを確認した。また、CNC装置で行われるドウェル処理効果も再現可能であることを確認した。
- (22) 高精度なNC加工シミュレーションを実現するため、加工中の切削力により生じる工具のたわみをNC加工シミュレーション後の形状に反映する手法を開発した。開発した手法は、切削除去体積より切削抵抗を求め、工具のたわみを算出すると共に工具を変形させて、素材形状から除去処理を行う手法である。その結果、NC加工シミュレーション後の形状に工具のたわみを再現できることを確認した。
- (23) NC加工シミュレーションの誤差シミュレーションに運動誤差と、工具のたわみの両方をシミュレーションさせることにより、誤差を複合した高速高精度なNC加工シミュレーションが実行可能であることを確認した。

第7章では、高速高精度加工を実現する際に問題となるさまざまな加工誤差を補正する手法について検討を行い、Boundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システムを提案した。提案するシステムは、Boundary-Map形状モデルから直接に加減速処理を行い、サーボサンプリング周期での位置データであるサーボデータを出力する形状補間により、指令精度を向上させる手法である。また、求めたサーボデータを用いてNC加工シミュレーションを行い、加工中に生じる誤差を予測してサーボデータに補正量を付加することにより誤差を補正し、高精度加工の実現を目指している。

そして、これらのシステムの有効性を確認するため、誤差補正の対象を運動誤差に限定し、運動誤差補正の機能を付加したBoundary-Map形状モデルに基づく高精度加工システ

ムの試作を行った。試作システムは大別して形状補間処理，モーション補正処理，P C - N C から構成される。

試作した Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムにより，運動誤差を補正できるかを確認するために，円弧指令に対して補正処理を行いその効果を検証した。

これらの主な結果を要約すると以下ようになる。

- (2 4) 工作機械への最終的な指令値がサーボサンプリング周期当たりの位置指令であることに着目し，Boundary-Map 形状モデルから直接サーボデータを生成する形状補間を提案した。そして，簡単な形状に対して，形状補間により指令軌道が生成できることを確認した。
- (2 5) N C 加工シミュレーションにより得た誤差量を補正してサーボデータに反映させる手法を提案した。そして，運動誤差シミュレーションにより適用する手法を開発した。
- (2 6) 形状補間により得たサーボデータとサーボデータにより N C 加工シミュレーションを行った結果を再度サーボデータに反映させることにより，高速高精度加工を目指すサーボデータに基づく高速高精度システムを提案すると共に，試作システムを構築した。そして，試作システムにより，オフラインで求めたサーボデータを利用してモータを駆動できることを確認した。
- (2 7) 試作した Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムを用いて，円弧指令に対する円弧半径減少について適応した。その結果，提案する Boundary-Map 形状モデルに基づく高精度加工システムにより円弧半径減少量が低減できることを確認した。

これらの結果より，開発した Boundary-Map 形状モデルは従来の形状モデルに比べ，C A M システムにおいて高速な工具経路が生成できるだけでなく，N C 加工シミュレーションや，形状補間など加工システムに幅広く利用できる形状モデルであることが明らかになった。

また，Boundary-Map 形状モデルに基づいて，工具経路を高速にそして高能率に工具経路を生成することにより，高速加工が実現できることが明らかになった。さらに，Boundary-Map 形状モデルに基づいて N C 加工シミュレーションを行うことにより，加工中の誤差を含めて誤差が再現でき，これらを形状補間と組み合わせて補正することにより高精度加工が実現できることが明らかになった。

これらのことより，Boundary-Map 形状モデルに基づいてこれらの高速加工，高精度加工の手法を適用することにより，高速高精度加工システム実現の可能性を示すことができた。

謝 辞

本論文は、筆者が国立沼津工業高等専門学校在職中の平成6年から現在まで、社会人入学で九州工業大学情報工学部大学院博士後期課程において行った研究を含め、鈴木裕教授のご指導のもとで行った6年間の研究成果をまとめた結果です。本研究を進めるに当たり、多くの諸先生、職場の上司、友人、知人および関係各位からご指導、ご助言およびご鞭撻をいただきました。

とりわけ、九州工業大学情報工学部教授 鈴木裕 博士におきましては、本研究の遂行並びに研究に対する心構えや姿勢、研究の意義など研究の基礎から本論文のまとめに至るまで、極めて有意義なご指導、ご鞭撻を賜りました。また、ご多忙中にもかかわらず、本論文に対して詳細な御高閲、有効なご指導およびご示唆をいただきました九州工業大学情報工学部教授 横関俊介 博士、同教授 安部憲広 博士、同教授 長澤勲教授、同教授 橋本正明 博士、同助教授 植原弘之 博士に厚く御礼申し上げると共に深い感謝の意を表します。

沼津工業高等専門学校制御情報工学科教授 柳下福蔵 博士には、研究上の相談に快く応じてくださり、常に示唆に富んだご意見と激励を賜りました。ここに、深い感謝の意を表します。また、研究に関する御意見や励まし、研究遂行上の環境整備においてご協力をいただきました、九州工業大学情報工学部助手 林朗弘 博士、同助手 是澤宏之 博士、株式会社グラフィックプロダクツ 伊藤哲史氏、沼津工業高等専門学校実習工場 佐藤宏氏、同制御情報工学科の教職員の皆様および、九州工業大学情報工学部機械システム工学専攻 鈴木・植原研究室の皆様には心から感謝いたします。

筆者は、沼津工業高等専門学校の教職にありながら、九州工業大学博士後期過程において研究を行う機会を与えていただきました。社会人入学にご理解とご支援をいただきました山下富雄 沼津工業高等専門学校長 に心からお礼申し上げます。

本論文の研究成果は、豊橋技術科学大学在学中の研究活動や三菱電機株式会社での実務経験を基礎としています。豊橋技術科学大学教授 星鐵太郎 博士、同教授 堀内幸 博士、元同助教授（現在、UC Davis 教授）山崎和雄 博士ならびに、三菱電機株式会社 赤祖父恭介氏、手嶋健夫氏、竹下虎男氏、加知光康氏に深く感謝いたします。

最後に、筆者を精神的、経済的に陰から支え続けてくれた妻 祐子、娘 彩花、息子 拓也、義母 杉江はる子、そして父 藤尾歩、母 ちえ子、兄 久善に心から感謝いたします。

2000年12月8日