

学位(博士)論文

**複合加工機の工程設計支援に向けた
加工フィーチャ認識方法に関する研究**

Study on feature recognition method
contributing to CAPP system
for multi-tasking machine tools

2020年3月

東京農工大学大学院
工学府 機械システム工学専攻

井上 友貴

目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1 工業的・工学的背景.....	1
1.2 CAM ソフトウェアと工程設計支援システム.....	3
1.3 関連する従来研究.....	4
1.4 本研究の目的.....	8
1.5 本論文の構成.....	8
第 2 章 複雑形状に向けた加工フィーチャ認識	11
2.1 はじめに.....	11
2.2 加工フィーチャ認識の流れ.....	12
2.3 特定形状部の処理.....	13
2.4 加工プリミティブの取得.....	16
2.5 加工プリミティブの変換.....	20
2.6 加工フィーチャの認識.....	22
2.7 ケーススタディ.....	23
2.8 おわりに.....	27
第 3 章 多軸・複合加工に向けた加工フィーチャ認識	29
3.1 はじめに.....	29
3.2 加工フィーチャ認識の処理.....	29
3.2.1 除去領域の抽出.....	29
3.2.2 境界面の取得と拡張.....	30
3.2.3 加工プリミティブの取得.....	31

3.2.4	加工フィーチャの認識	32
3.2.5	加工フィーチャ認識までの処理の様子	33
3.3	ケーススタディ	37
3.3.1	5軸制御のマシニングセンタを想定したパターン	37
3.3.2	複合加工機を想定したパターン	41
3.4	加工実験	45
3.4.1	使用した工作機械	45
3.4.2	工程設計と工具経路生成	48
3.4.3	加工結果	52
3.5	おわりに	54
第4章	複合加工機の機能を活かす工程設計	55
4.1	はじめに	55
4.2	複雑な構造を有する複合加工機への対応	55
4.3	把持替えを考慮した加工フィーチャ認識	58
4.4	同時加工を考慮した加工工程の決定	61
4.5	ケーススタディ	64
4.5.1	把持替えも同時加工も取り扱わないパターン	64
4.5.2	把持替えのみ取り扱うパターン	68
4.5.3	把持替えと同時加工を取り扱うパターン	71
4.5.4	シミュレーションによる加工時間の予測	73
4.6	おわりに	75
第5章	設計情報を参照した工程設計	77
5.1	はじめに	77
5.2	設計情報を参照した加工プリミティブの取得	78
5.3	設計情報を参照した加工順序の設定	79
5.4	複数の加工プリミティブで構成される加工フィーチャの認識	82
5.5	ケーススタディ	83
5.6	おわりに	91

第6章 結 論	93
今後の展望	97
参考文献	99
謝 辞	103
付 録	105

第1章

緒 論

1.1 工業的・工学的背景

近年、コンピュータの処理速度の飛躍的な向上に伴い、様々な分野でコンピュータを利用した技術が急速に普及、発達してきた。製造業においても、製品の開発設計、生産設計、生産・品質管理など、その利用範囲は多岐にわたっている。例えば機械部品や製品の場合、開発設計では3次元CAD (Computer Aided Design) ソフトウェアが用いられ、ソリッドモデルで形状を表現することにより、複雑形状を容易にモデリングできるようになっている。また、生産設計ではCAM (Computer Aided Manufacturing) ソフトウェアを用いて、CAD ソフトウェアで定義されたモデルの形状データから数値制御工作機械で加工するために必要なNC (Numerical Control) データの生成が容易になっている¹⁾。

CAD は 1959 年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) で開発が始まり、GM や IBM、ロッキードなども 1960 年代にかけて開発が進められてきた。その後、CSG (Constructive Solid Geometry) や B-Reps (Boundary Representation) といった 3 次元モデルの表現技術が開発され、3 次元 CAD ソフトウェアが実用化され、パラメトリックモデリングやフィーチャモデリング機能の開発によって、3 次元モデルの作成が容易になった²⁾。一方、CAM ソフトウェアは米国空軍の要請で NC 技術の開発が開始され、1949 年に MIT の協力でフライス盤が NC 化された。日本においても、ファナックが NC タレット・パンチプレスを公開し、牧野フライスなども NC フライス盤の開発が進められた²⁾。

一方で、生産形態は多品種少量生産へと推移し、生産現場ではより効率的な生産システムが求められている。部品形状などの加工で必須な NC 工作機械は、高速・高精度化に加え、多様な機械加工のニーズに対応するため多軸化・複合化・多機能化が進み、特に工程集約と高能率加工が期待される多軸・複合加工機の導入が進んでいる³⁾⁴⁾。多軸制御工作機械は、直動・回転軸を複数制御することができる工作機械を表し、現在では 5 軸制御のマシニングセンタに代表されるように、X, Y, Z 軸の直進 3 軸に加え、各直進軸まわりの回転軸 A, B, C 軸のうち 1 つ以上を利用して工具姿勢を工作物に対して任意の位置・姿勢に制御できるものを指す。また、複合加工機は旋削加工とフライス加工の異なる機械加工の機能を 1 台に備え、旋削主軸の回転軸とフライス加工用の主軸が

傾斜軸を備えることで5軸制御加工を行える工作機械である。これらの多軸・複合加工機は複雑形状の機械加工において、1回の段取りで取り付け面以外の全方向から加工することができ、工作物の取り付け外しに伴う取り付け誤差を無くすることができる。また、複合加工機は旋削加工とフライス加工の両機能を有するため、性質の異なる2つの加工を同一加工機上で行うことができ、工程集約による工作機械の台数削減・省スペース化が実現できる³⁾。図1.1と図1.2に5軸マシニングセンタと複合加工機の一例を示す。

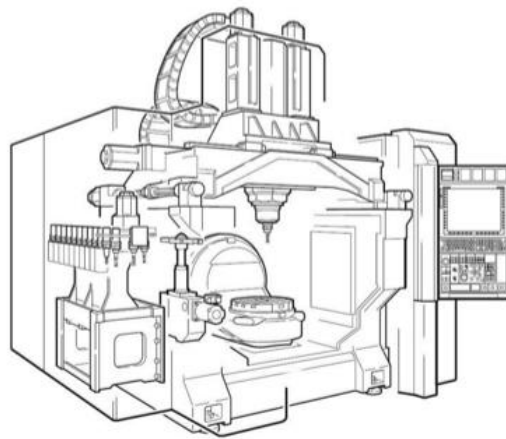


Fig. 1.1 5-axis machining tool⁵⁾

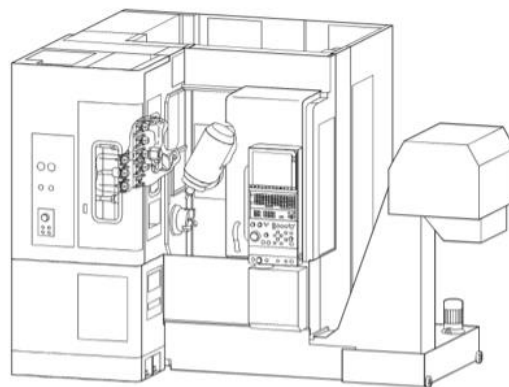


Fig. 1.2 Multi-tasking machine tool⁵⁾

1.2 CAM ソフトウェアと工程設計支援システム

多軸・複合加工機は様々な機械加工のニーズに応えることができるが、これらの NC 工作機加工を用いた加工では NC プログラムを作成する必要がある。NC プログラムは加工作業者が手動で作成することも可能ではあるが、多軸化・複合化された工作機械や複雑な形状を加工するための NC プログラムを手動で作成することは困難である。現状、NC プログラムの生成には CAM ソフトウェアの利用はほぼ必須となっている。図 1.3 に CAM ソフトウェアを用いた NC プログラム生成の流れを示す。CAD ソフトウェアで作成した製品形状を CAM ソフトウェアに入力することで NC プログラムを出力する。出力された NC プログラムを NC 工作機械に入力することで加工が行われる。近年では CAD ソフトウェアと CAM ソフトウェアを統合し、製品設計から NC プログラムの生成までを統合して行う場合も存在する。しかし、CAM ソフトウェアを用いて NC プログラムを生成するためには CAM ソフトウェアが要求する情報の生成と入力に多大な時間と労力を要しており、生産リードタイムの中で加工準備時間の割合が大きくなっている。CAM ソフトウェアへの入力情報を生成する工程設計では、機械部品や製品の CAD モデルの形状データから加工箇所を選択し、加工方法や順序を決定しているが、これらの作業についても CAM ソフトウェアが担うことが理想的である。しかしながら、市販されている CAM ソフトウェアの多くは対話型と称して、作業者に加工箇所の選択や加工方法・順序の決定を委ねており、作業者に高い技能と時間的負担を強いているのが現状である。このため、生産リードタイムにおける加工の準備に占める時間の削減を目指し、従来は作業者が行っていた工程設計を代替する、コンピュータを援用した工程設計支援システム（CAPP: Computer Aided Process Planning）の開発が求められている。

CAD モデルから加工箇所を選択し、加工順序や加工方法、工具などを設定するために工程設計を行う必要があり、生産リードタイムの中で加工準備時間の割合が大きくなっている。

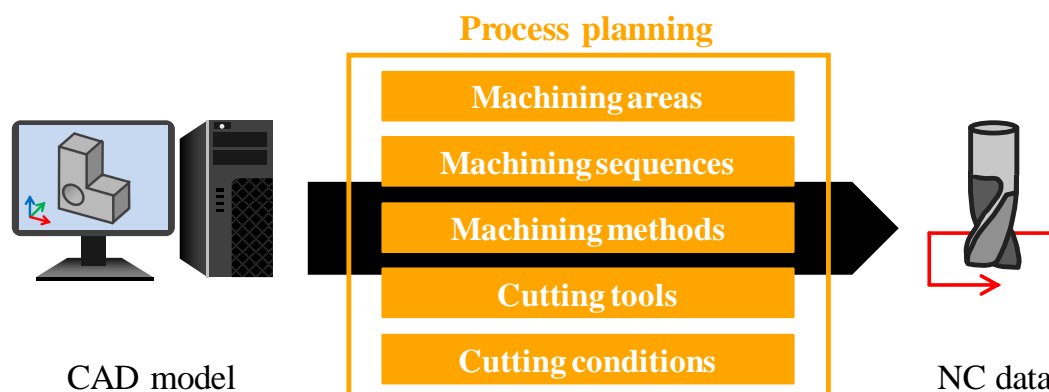


Fig. 1.3 Process of generation of NC data

1.3 関連する従来研究

近年のものづくりにおいて、工程設計支援システムの開発は重要な課題であり、様々な研究が行われている。加工準備時間を短縮するため、工程設計支援システムの開発では CAD モデルから認識した形状に対し、加工箇所や工具、加工方法・順序などの加工工程に関する情報を自動的に決定することが求められる⁶⁾。そこで最も重要となるのが、加工フィーチャと呼ばれる加工工程を特徴付ける領域の認識であり⁷⁾⁸⁾、これまでに様々な加工フィーチャとその認識手法が提案されてきたが、そのほとんどでは目標形状を対象にして加工フィーチャを認識している。しかしながら、加工によって取り除かれる除去領域は素材形状によって異なるため、本来は目標形状でなく除去領域から加工フィーチャは認識されるべきである。

韓らや深田らにより除去領域から複数パターンの加工フィーチャを認識する手法が提案され⁹⁾¹⁰⁾、奥田らや宇古らはこの加工フィーチャ認識手法に基づいた工程設計支援システムを開発した¹¹⁾¹²⁾。このシステムでは素材形状と目標形状の差分領域を除去領域として抽出後、除去領域が有する XY, YZ, ZX 平面に平行な面で除去領域を分割しすることで、微小加工領域を取得する。その後、総当たりで X 軸, Y 軸方向に隣接する微小加工領域を組み合わせることで加工プリミティブを取得する。微小加工領域の組合せによって様々なパターンの加工フィーチャが認識される。しかし、この手法では加工フィーチャの認識パターンが膨大となり、採用すべき加工フィーチャの決定が困難であるといった課題がある。そこでこの課題に対し、山田らは除去領域を微小加工領域へと分割してから組み合わせる2つの工程を1つにまとめることで、分割しながら加工フィーチャを認識する手法を提案している¹³⁾。以上の研究では微小加工領域を X 軸と Y 軸方向で組み合わせていたのに対し、森永らは Z 方向の組合せを考慮した加工フィーチャの認識手法を提案している¹⁴⁾¹⁵⁾。

一方、Sakurai らは、除去領域を共有する領域を有する加工フィーチャ同士の和集合として表現する手法を提案した¹⁶⁾¹⁷⁾。また、Woo らは Sakurai らが提案した手法を取り入れた工程設計支援システムを提案している¹⁸⁾。このシステムでは Graph machining approach (GRP), Maximal volume decomposition (MVD), Negative feature decomposition (NFD) の3つの工程により除去領域から加工フィーチャを認識する。GRP では、他の加工フィーチャと領域を共有しない加工フィーチャを認識する。MVD では、互いに共有する領域を持つ加工フィーチャを認識する。NFD では、共有領域を持つ加工フィーチャをそれぞれ分割し、最終的な加工フィーチャを認識する。また、Kailash らは除去領域と製品形状の接触する面の組合せから加工フィーチャを認識するシステムを提案してい

る¹⁹⁾。Kim らや Wang らは穴をあらかじめ認識し、円柱はそれを内包する凸多面体として、凸多面体に分割することで加工フィーチャを認識するシステムを提案している²⁰⁾⁻²¹⁾。このシステムを発展させ、Miao らは素材形状と素材形状を構成する面、および加工途中の面によって加工フィーチャを表現する手法を提案し²²⁾、Dong らは除去領域を凹エッジで分割する手法を提案している²³⁾。また、Nagaraj らはあらかじめ直方体や円柱などをプリミティブとして用意し、素材形状となるまで目標形状に付加して加工フィーチャを認識する手法を提案している²⁴⁾。他にも、西田らは分割面が過剰になることを避けながら除去領域を分割して加工フィーチャを認識する手法を提案している²⁵⁾⁻²⁶⁾。このように、これまで様々な加工フィーチャとそれらを認識する工程設計支援システムが提案されたきたが、いずれもフライス加工を対象としており、旋削加工も可能な複合加工機は想定されていない。

一方、旋削加工とフライス加工の両機能を有する複合加工機を対象とした加工フィーチャ認識手法として、濱田らは目標形状を構成する面と辺の情報から加工フィーチャを認識する工程設計支援システムを開発し¹⁾、Zhu らは目標形状の面と辺のつながりをグラフ状に表現した AAG (Attributed Adjacency Graph) と幾何情報から加工フィーチャを認識する手法を提案している²⁷⁾が、これらは目標形状を基に加工フィーチャが認識されている。これに対して、Dwijayanti らや清岡らは除去領域から加工フィーチャを認識する手法を提案している²⁸⁾⁻³⁰⁾が、除去領域を XY, YZ, ZX 平面および除去領域が有する面で極めて細かく分割することで加工フィーチャを認識し、複数の組合せごとに任意の指標を用いて工程設計の優劣を評価するため、加工工程の決定に膨大な計算を要すると考えられる。

特に関連する先行研究として、濱田らは CAD 上で定義された素材形状と目標形状を入力情報とし、入力された目標形状を構成する面から加工できる形状を表現した図 1.4 に示す加工フィーチャを認識する複合加工機用の工程設計支援システムを開発した¹⁾。しかし、ここで認識される加工フィーチャは次のような課題がある。1 つ目は加工フィーチャに対して加工方法が一意に決定されていることである。例えば同図の Turning step は旋削加工用に定義されている加工フィーチャだが、複合加工機を用いた加工ではフライス加工も選択できる。同様に Inner turning face も旋削加工だけでなくドリルを用いた穴あけ加工も選択可能である。この点を踏まえると、加工フィーチャに対して加工方法を一意に決定するのは好ましくないと考えられる。

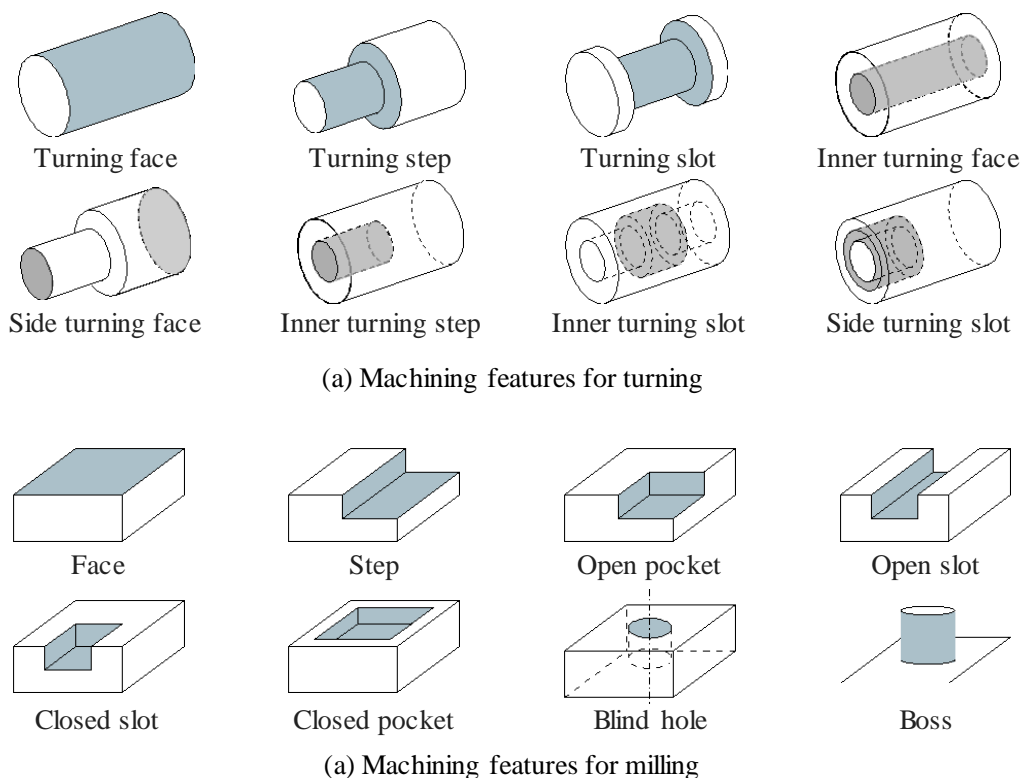


Fig. 1.4 Proposed machining features¹⁾

2 つ目は加工フィーチャが目標形状のみに基づいて認識されていることである。先述したように、図 1.5 に示すように除去領域は目標形状だけでなく素材形状によって変化する。除去領域は加工方法を決定する上で重要な要素と考えられ、加工フィーチャは除去領域から考慮されるべきであると考えられる。

また、3 つ目の課題として、目標形状に対して加工フィーチャが 1 パターンしか認識されないことが挙げられる。加工方法は作業者が保有する工具や工作機械に依存するため、加工方法等を決定するために必要な加工フィーチャは、複数のパターンで認識される必要がある。

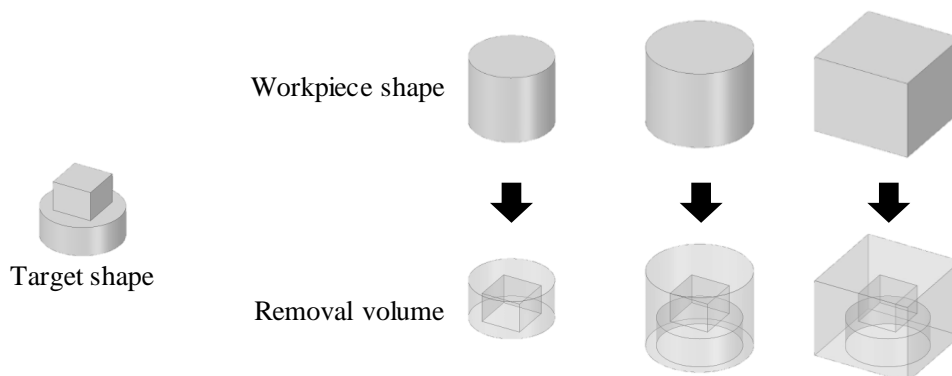


Fig. 1.5 Difference of removal volume

これらの課題を踏まえ、上野らは次のような特徴を有する図 1.6 に示す新たな加工フィーチャを提案した³¹⁾。

- A) 除去領域から認識する。
- B) 加工フィーチャを無作為ではなく、使用者の意向を取り入れて認識する。
- C) 加工順序の設定と加工フィーチャの認識を逐次行う。
- D) 加工方法を一意に定めない。

また、惟村らは新たな加工フィーチャに対応した合理的な工程設計を行うために、工程設計支援システムで提示された加工工程案に対し、加工時間や加工精度、消費電力等の工程を評価するための指標を確立した³²⁾。

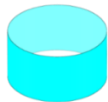




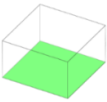
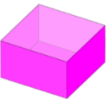



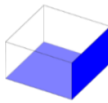
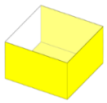
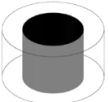
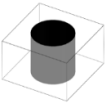
(A) Through hole  Generated surface: 1 (Curved surface: 1)	(B) Face C  Generated surface: 1 (Curved surface: 0)	(C) Blind hole  Generated surface: 2 (Curved surface: 1)
(D) Split face C  Generated surface: 2 (Curved surface: 0)	/	
(E) Through pocket  Generated surface: 4 Number of opposite pairs: 2	(F) Face P  Generated surface: 1 Number of opposite pairs: 0	(G) Closed pocket  Generated surface: 5 Number of opposite pairs: 2
(H) Split face P  Generated surface: 2 Number of opposite pairs: 1	(I) Open pocket  Generated surface: 3 Number of opposite pairs: 0	(J) Open slot  Generated surface: 3 Number of opposite pairs: 1
(K) Step  Generated surface: 2 Number of opposite pairs: 0	(L) Closed slot  Generated surface: 4 Number of opposite pairs: 1	(a) Boss C  Generated surface: 1 (Hole: 1)
		(b) Boss P  Generated surface: 1 (Hole: 1)

Fig. 1.6 Proposed new machining features²⁶⁾

1.4 本研究の目的

NC 工作機械の多軸化・複合化に伴い、先述の通り CAM ソフトウェアを用いた NC プログラムの生成はほぼ必須である。しかし、その機能を活かすためには CAM ソフトウェアの高度化も求められており、日本工作機械工業会が纏めた技術課題としても工程設計の自動化が挙げられている³³⁾。現状の CAM ソフトウェアが対話型と称して工程設計を作業者の技能や経験に依存しているが、加工フィーチャを認識して加工する形状と加工工程を結びつけることで工程設計の自動化に寄与できる。そのため本研究では、様々な工作機械に対応した CAM システムへの入力を補助する工程設計支援システムの開発を目的としている。

そこで上野らにより提案された加工フィーチャを参考に、入力された素材形状と目標形状の CAD モデルから自動的に加工フィーチャを認識するシステムを構築する。上野らの加工フィーチャは円柱と直方体の単純形状であることを前提としており、実用的な複雑な部品形状などには対応していない。そこで、まずは 3 軸制御のマシニングセンタを想定して加工プリミティブと呼ぶ単位形状の取得を簡便にすることで複雑形状から加工フィーチャを認識する手法を確立し、適応範囲を多軸・複合加工機へと拡張する。その後、多様な複合加工機に対応するために、第 2 旋削主軸を用いた把持替えや、刃物台タレットを用いた同時加工を考慮して加工フィーチャを認識する。さらに、近年の 3 次元製図の動向を参考に、3 次元データに付与された設計情報を参照して加工フィーチャを認識することで、設計者の意図を工程設計へと反映させることを目指す。

1.5 本論文の構成

- 第 1 章「緒論」では、工業的・工学的背景、工程設計支援システム、本研究の目的、本論文の構成について述べる。
- 第 2 章「複雑形状に対応した加工フィーチャ認識」では、上野らが提案した加工フィーチャを参考に、面取りや自由曲面などの特定形状部を含む複雑形状から認識する手法について述べる。
- 第 3 章「多軸・複合加工機に対応した加工フィーチャ認識」では、より構造が複雑な多軸・複合加工機へと対応させるための加工フィーチャ認識手法について述べる。
- 第 4 章「複合加工機の機能を活用した工程設計」では、第 2 旋削主軸や下側刃物台タレットを有するより高機能な複合加工機に対応した工程設計支援のための加工フィーチャ認識手法について述べる。
- 第 5 章「設計情報を参照した工程設計」では、3 次元データの更なる活用のための 3

次元製図の動向を参考に，設計者の意図を工程設計に反映させるために，幾何公差や表面粗さなどの設計情報を参照して加工フィーチャを認識する手法について述べる．

- 第6章「結論」では，各章で得られた結果についてまとめを述べる．

第2章

複雑形状に向けた加工フィーチャ認識

2.1 はじめに

従来の加工フィーチャ認識に関する研究では、定義された加工フィーチャの形状が取得されるまで必要以上に分割されてきた。例えば、上野らの提案した加工フィーチャでは、円柱と直方体の単純な形状で表現しているため、目標形状が複雑な場合は想定されおらず、特殊な工程となる面取り箇所や自由曲面が目標形状に含まれている場合など、円柱や直方体で表現できない複雑な形状には対応できていなかった。図 2.1 (a) に示すような屈曲した溝形状では、想定されている円柱や直方体で表現するために同図 (b) のように除去領域を分割して加工プリミティブを取得し加工フィーチャを認識するが、加工を想定すると分割して認識した加工フィーチャが適切ではない場合がある。一方、複雑形状ごとに加工フィーチャを定義すれば加工の特徴を任意に表現することは可能になるが、考慮すべき複雑形状は無数に存在し、定義すべき加工フィーチャの種類も無数となり現実的ではない。そこで本章では、従来は対応できなかった複雑形状を、加工フィーチャの種類が無数になるのを避けるために円柱や直方体といった単純形状へ近似することで有限の加工フィーチャとして認識する手法について述べる。なお、本研究では円柱と直方体を単純形状とし、それ以外を複雑形状と呼称する。

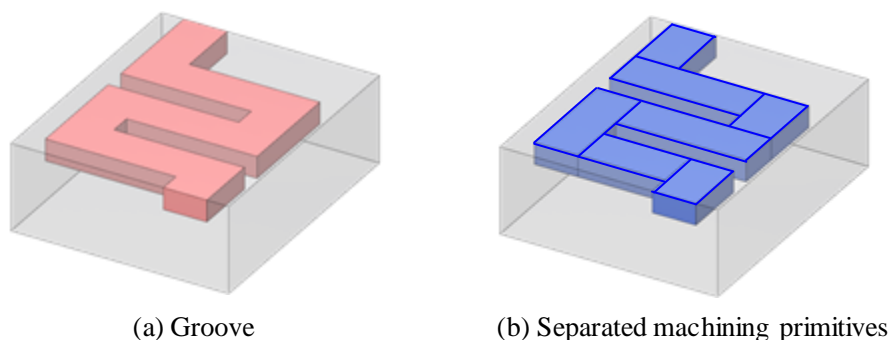


Fig. 2.1 Example of recognition of machining features for groove

2.2 加工フィーチャ認識の流れ

提案する加工フィーチャ認識手法の流れを図 2.2 に示す。図中で太枠に囲われたものが本研究で新たに加えた特徴的な処理である。

本手法では、CAD ソフトウェア上で定義された素材形状と目標形状を入力する。その後、特殊な工程となる面取り箇所や自由曲面などの特定形状部を目標形状から取り除いて近似する。次に、近似した目標形状と素材形状との差として得られる除去領域から加工プリミティブを取得し、円柱や直方体のような単純形状に変換する。このとき、組合せを削減するために各加工プリミティブに対し加工順序を設定しながら加工フィーチャを認識するが、この処理は先行研究³¹⁾と同様である。その後、各加工プリミティブを元の形状へと復元し、最初に取り除いた面取り箇所などを工程の最後に加えて加工フィーチャのリストを出力する。なお、本章では提案手法の基本的な有用性を確認するため Z 軸方向に主軸を有するマシニングセンタによる 3 軸制御のフライス加工を想定しており、工作機械の機械座標系と CAD モデルの座標系は一致するものとしている。また、提案手法の実装では CAD ソフトウェアとしてアイコクアルファ製 Simple Modeler とその API 機能、開発言語として C# を用いている。

本研究では除去領域を得るために式 1.1 で示すようなブーリアン演算を要するが、CAD ソフトウェアでは標準の操作であり、API を用いることでプログラムから実行可能である。

$$V_{\text{Rem}} = W - T \quad (2.1)$$

ただし、 V_{Rem} は除去領域、 W は素材形状、 T は目標形状を示す。また、CAD モデルを構成する平面は平面上の任意の点 $P(x, y, z)$ と平面の向きを示す法線ベクトル \mathbf{n} で表現でき、円筒面は円筒軸上の点 $P(x, y, z)$ と円筒の半径 r 、軸の方向を示すベクトル \mathbf{n} で表現できるが、平面や円筒面は CAD ソフトウェアの標準の操作で描画可能なため、API を用いて取得している。

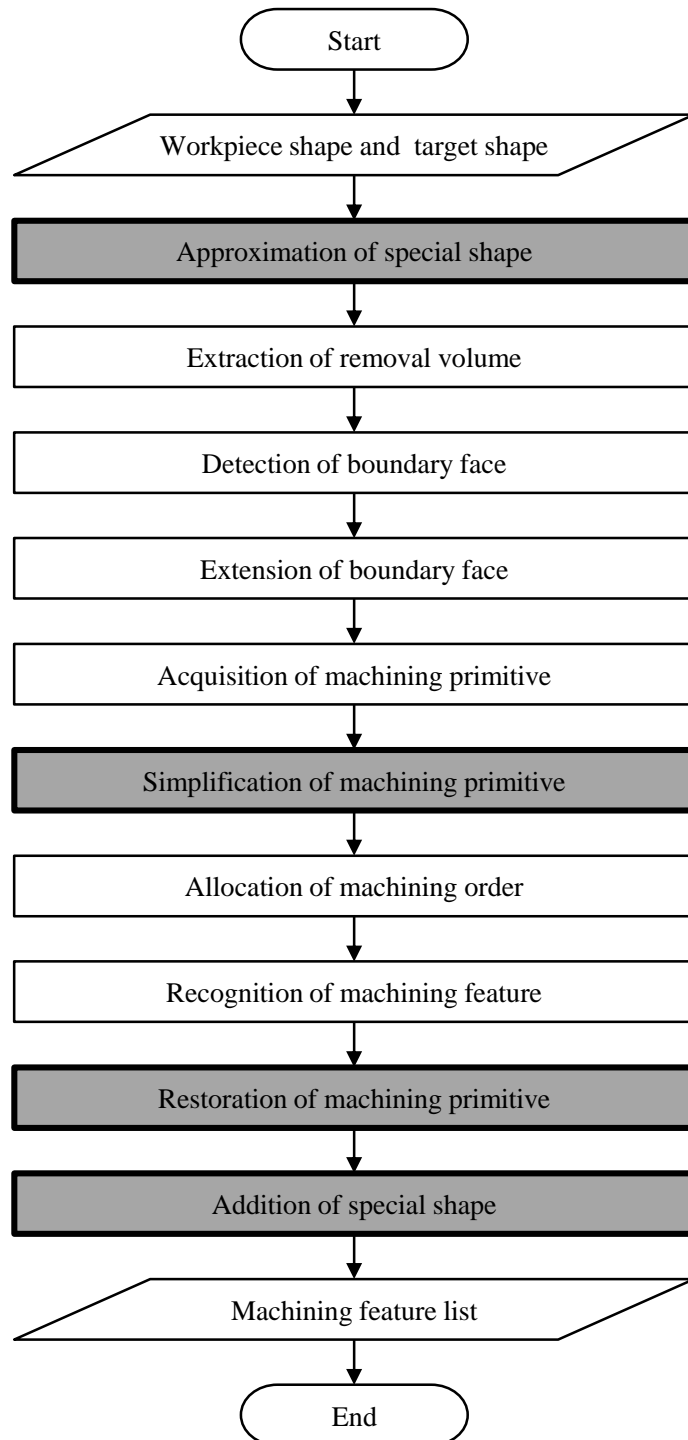


Fig. 2.2 Proposed recognition flow of machining feature

2.3 特定形状部の処理

入力された目標形状に対して、最初に特殊な工程となる面取り箇所や自由曲面などの特定形状部を取り除いて近似する処理を行う。目標形状のうち、図 2.3 (i) に示すように XY, YZ, ZX 平面のいずれにも平行でない面を対象とし、エッジの長さを l 、任意の閾値を t として、

$$l < t \quad (2.2)$$

を満たす場合に面取り箇所として認識している。次に、面取り箇所として認識された面の中で最長のエッジのどちらかを有する面を拡張して、(ii) のように拡張した面上に面取り箇所を投影する。この投影された輪郭を (iii) のように目標形状側に押し出し、目標形状との和を取ることで面取り箇所を取り除いて (iv) に示す近似した目標形状を得る。なお、曲線状のエッジを利用して図 2.4 のようにフィレットやコーナーR も同様に検出し、近似した目標形状を得る。近似後の新たな目標形状と元の目標形状の差分領域は、図 2.5 に示すような面取り箇所やフィレット、コーナーR を付与すべき特殊な加工プリミティブとする。

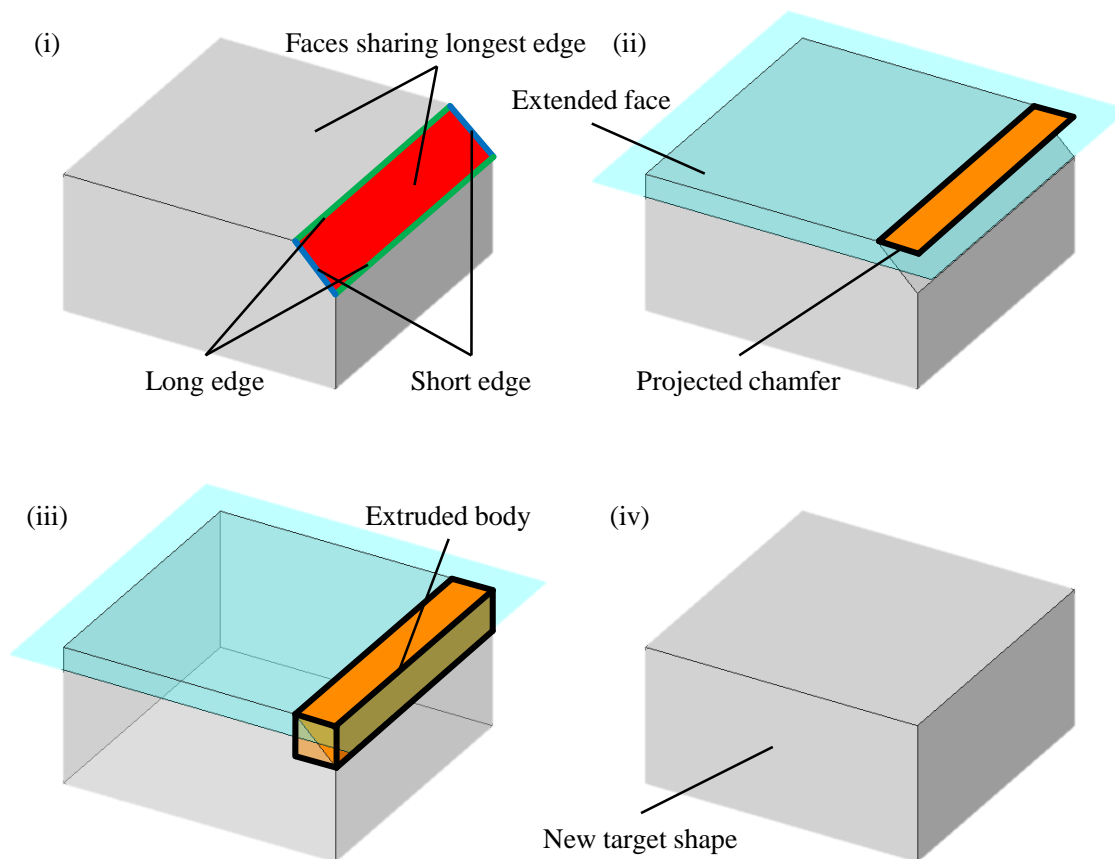


Fig. 2.3 Detected chamfer and new target shape

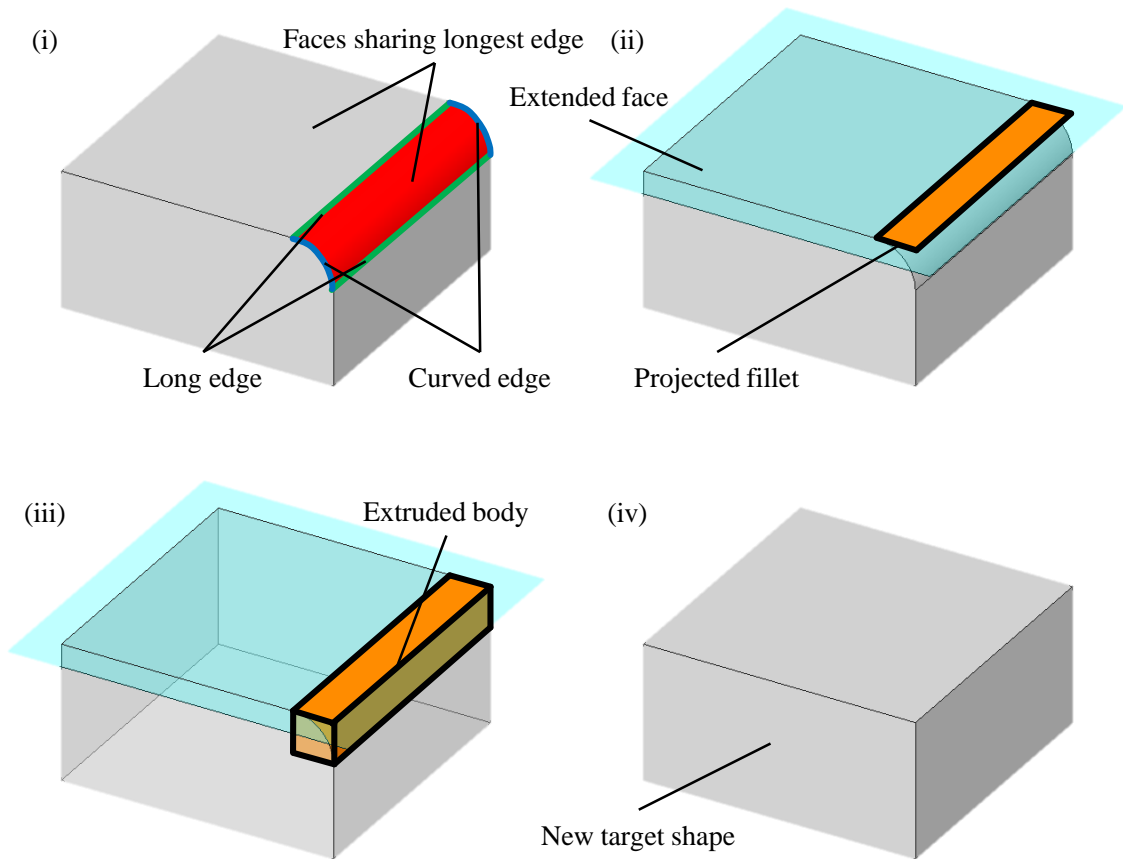


Fig. 2.4 Detected fillet and new target shape

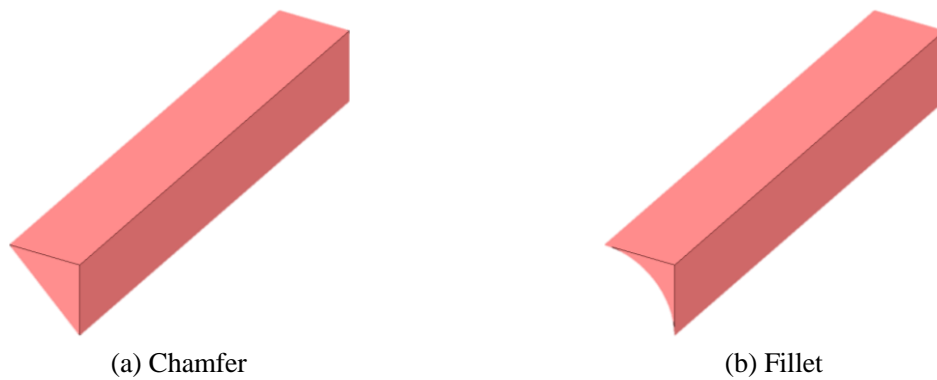


Fig. 2.5 Special machining primitives of chamfer and fillet

また，図 2.6 (a) のように目標形状に自由曲面部を持つ場合には，同図 (b) のように自由曲面部を内包する最小の直方体を定義し，目標形状との和を取ることで同図 (c) に示す自由曲面部を除いた平滑化した目標形状へ近似する．なお，上記の面取り箇所やフィレット，コーナーR などと同様に，変換された目標形状と元の目標形状の差分領域は図 2.7 のような自由曲面加工のための特殊な加工プリミティブとする．

以降では目標形状に面取り箇所や自由曲面などの特定形状部が存在しないものとして、除去領域から加工プリミティブを取得してそれらに対して加工フィーチャを認識する。

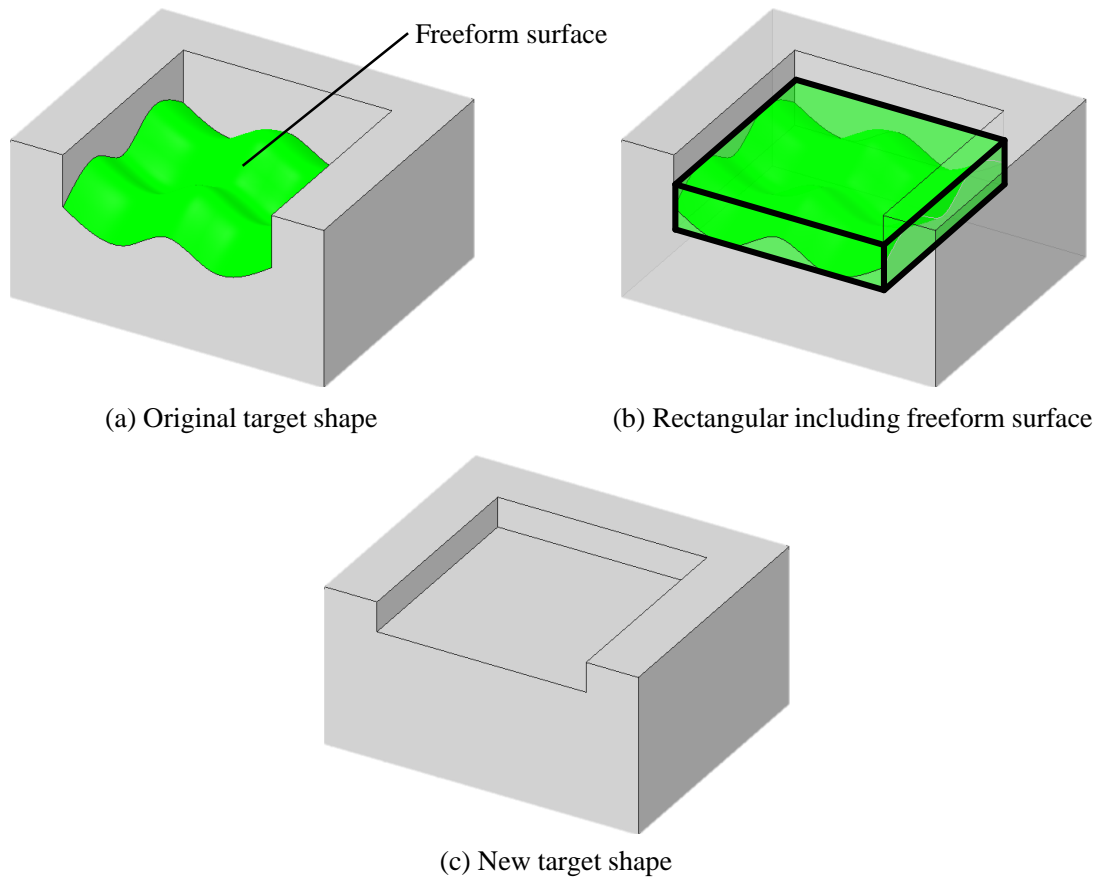


Fig. 2.6 Detected freeform surface and new target shape

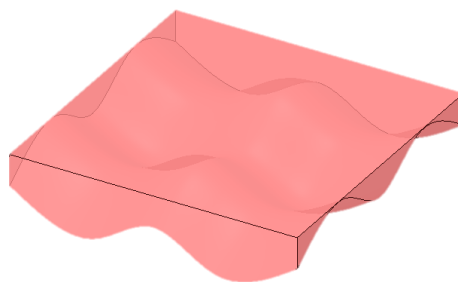


Fig. 2.7 Special machining primitive of freeform surface

2.4 加工プリミティブの取得

本研究では提案する複雑形状に対する加工フィーチャ認識手法の基本的な有用性を確認するため、3軸制御のマシニングセンタによるフライス加工を前提としてXY平面に平行な面だけで分割することで、加工プリミティブの取得を簡便にする。ここで、図2.8 (a) (b) に示す素材形状と目標形状の差として得られる同図 (c) の除去領域から加工

プリミティブを取得する例を示す．ここではまず，図 2.9 のように目標形状の Z 方向最上面より上側，最外周部より外側，最下面より下側に除去領域が存在する場合にはその領域を加工プリミティブとして先行して取得する．その後，図 2.9 のように残った除去領域と境界面から加工プリミティブを取得する．ここでは図 2.10 に示す 5 種類の加工プリミティブが取得される．このとき，境界面が有する凹エッジのうち XY 平面に平行な直線エッジと Z 軸に平行な中心軸を持つ円エッジを参照して加工プリミティブを取得している．なお，凹エッジはそのエッジを構成する 2 面のなす角が 180° よりも小さいエッジを指す．

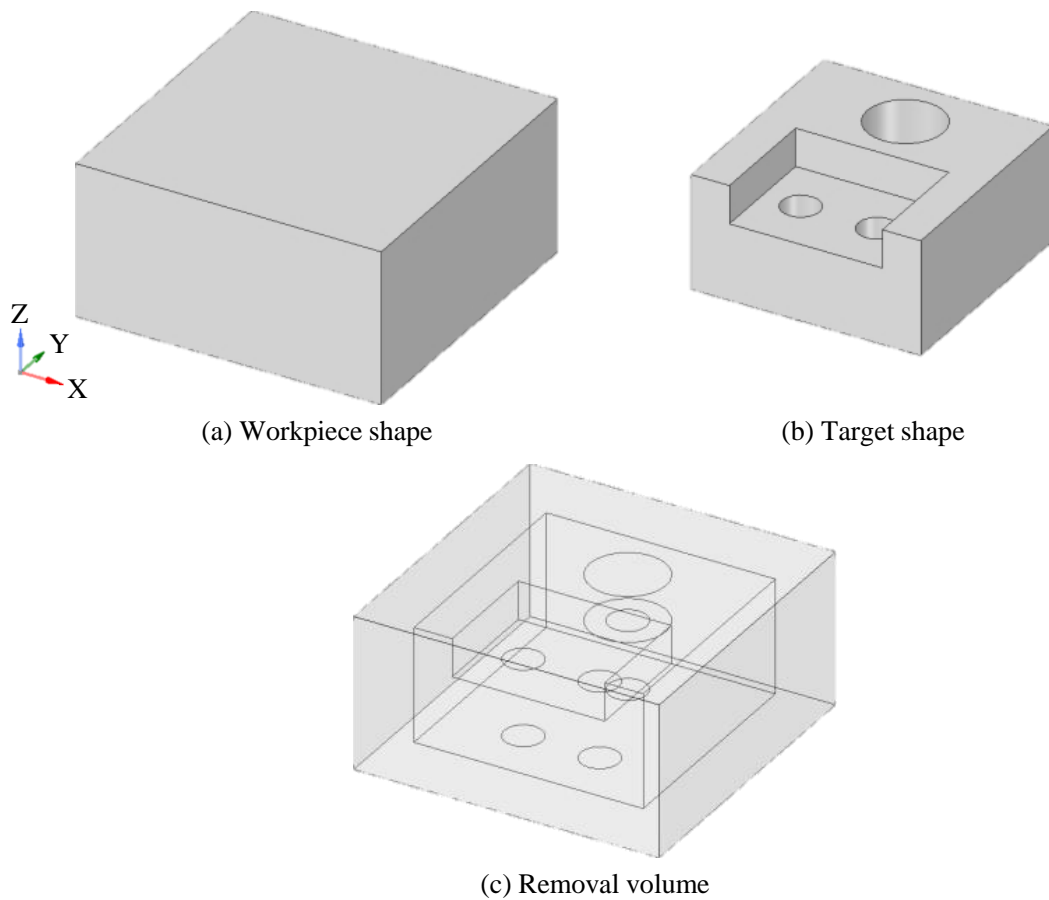


Fig. 2.8 Input data and removal volume

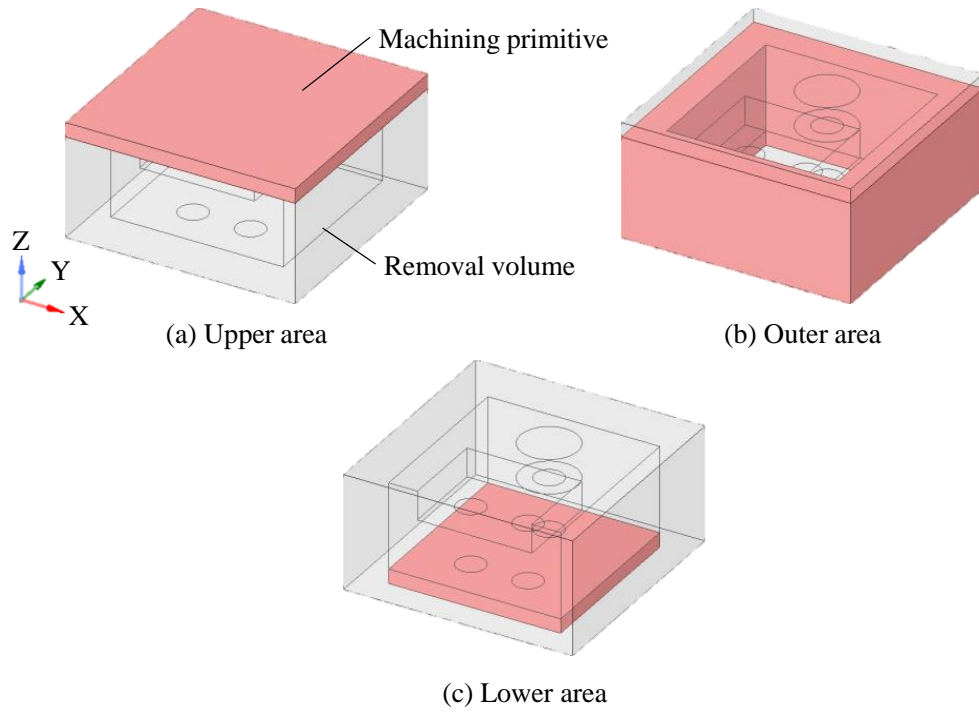


Fig. 2.9 Surrounding machining primitives of target shape

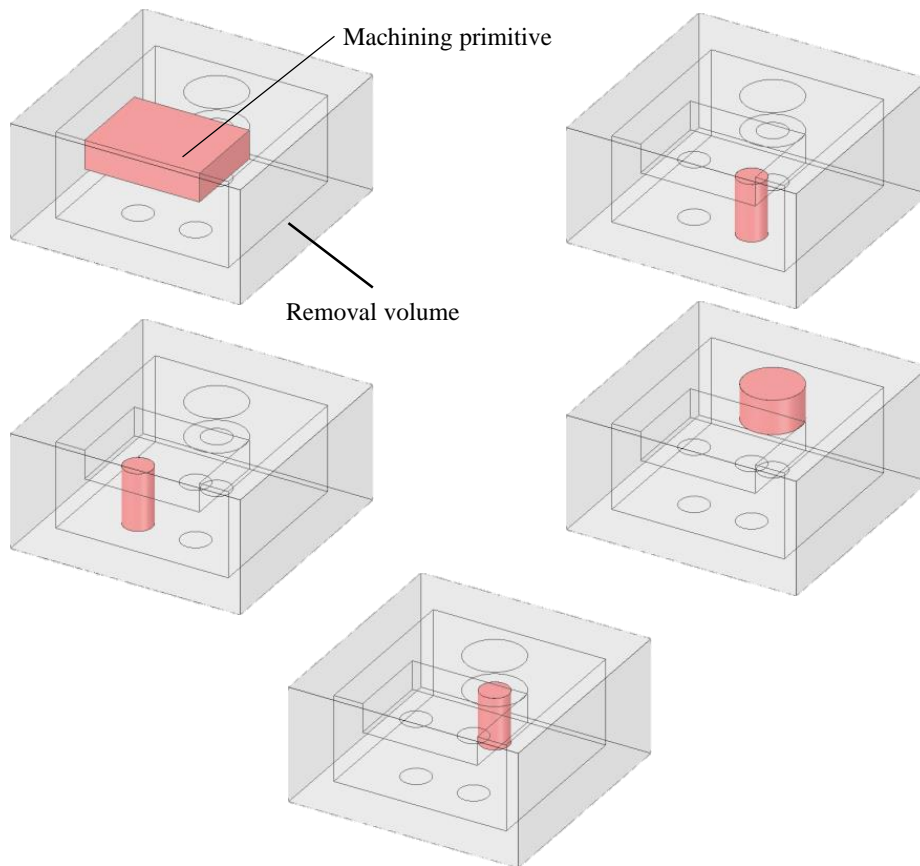


Fig. 2.10 Other machining primitives

また、図 2.11 のように、これらの凹エッジを含む面の Z 座標が大きいものから順に加工プリミティブとして取得するが、凹エッジに繋がる面が平面の場合にはその面より上側の除去領域を取得し、円筒面の場合には、その面の内部を加工プリミティブとして取得する。ただし、除去領域に平面と円筒面が共に含まれる場合には、最大の Z 座標の大きい面を有する加工プリミティブを先に取得し、同じ場合には平面を有する加工プリミティブを先に取得している。

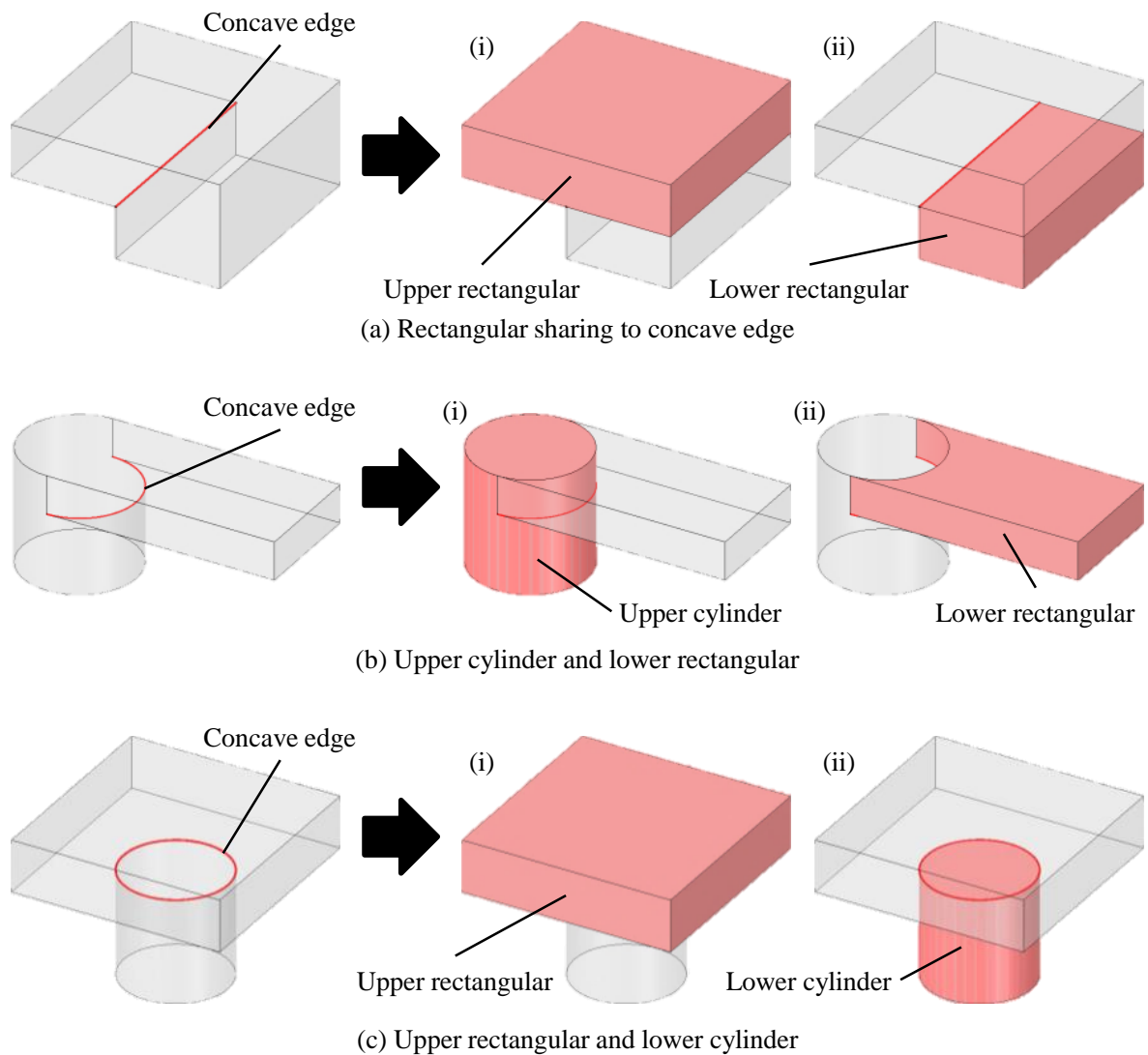


Fig. 2.11 Priority of acquisition of machining primitives

2.5 加工プリミティブの変換

加工フィーチャは加工プリミティブに加工順序を設定し、その形状と創成面の情報を基に第1章の図1.1のように認識する³¹⁾。取得された加工プリミティブが円柱や直方体の単純形状で表現される場合は、第1章で述べたように創成面の形状や数、また対向する創成面を1組としたときの組数によって各種の加工フィーチャとして認識できる。しかし、これまでは加工プリミティブが単純形状でない場合には対応できていなかった。一方、複雑形状に対して形状ごとに個別に加工フィーチャを定義した場合、考慮しなければならない加工フィーチャの数が膨大となるため現実的ではない。

そこで本研究では、複雑な形状の加工プリミティブを円柱や直方体のような単純形状の加工プリミティブへ変換することによって加工フィーチャを認識する手法を提案する。このとき、複雑形状となるテーパやドリル先端で創成されるような円錐形状は、図2.12のようにその形状を内包する円柱に変換するものとし、それ以外は図2.13のように形状を内包する直方体へと変換して加工プリミティブとして取得する。

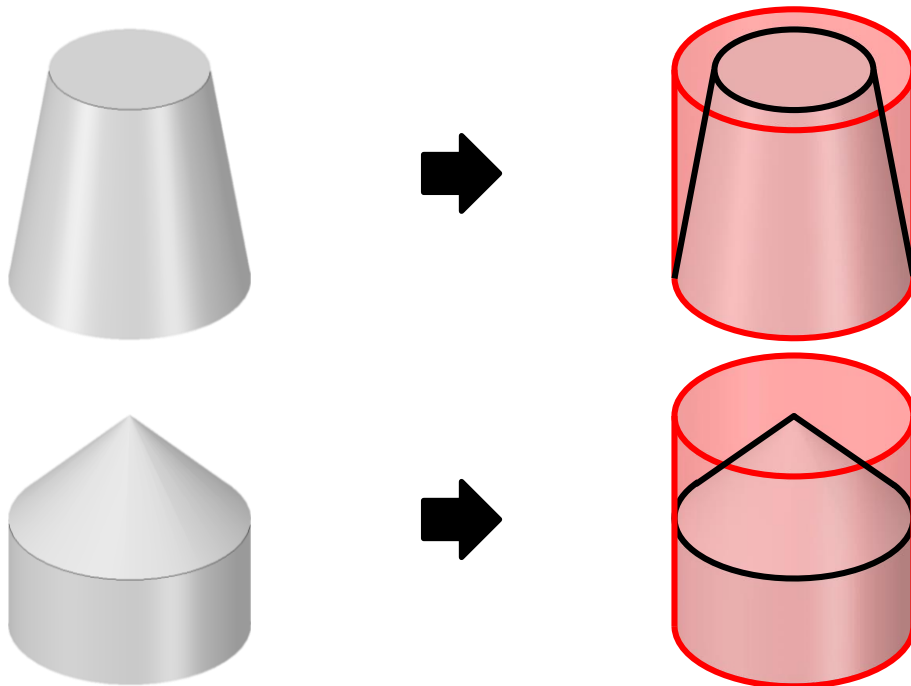


Fig. 2.12 Simplification of machining primitive to cylinder

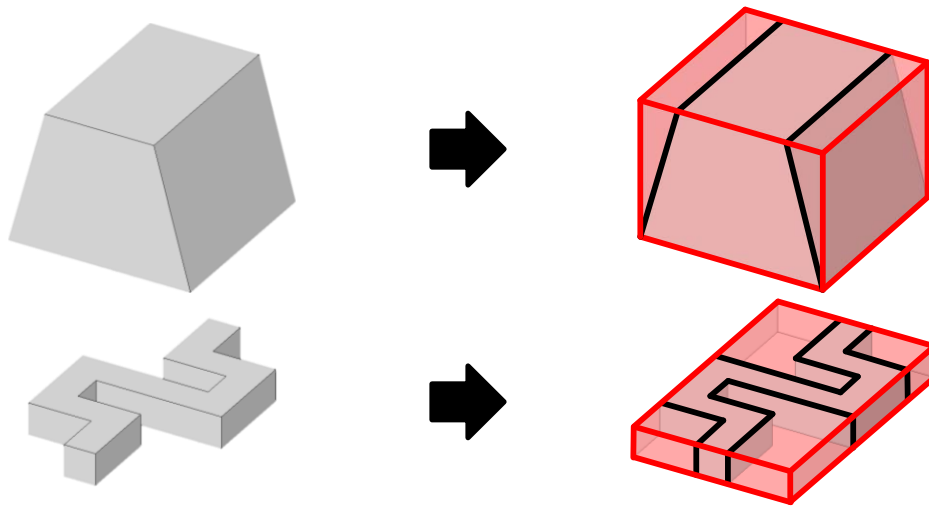


Fig. 2.13 Simplification of machining primitive to rectangular

複雑形状の加工プリミティブを内包する直方体へ変換した後に加工フィーチャを認識するには、創成面の数と対向する創成面の組数の情報が必要となる。このため、例えば図 2.14 (a) のような加工プリミティブが取得されたとき、元の形状で創成面であった面は変換された直方体においても対応する面に創成面という属性を引き継いでいる。ここでは、同図 (b) のように変換した直方体の有する面の法線方向が、元の複雑形状の創成面の法線方向と一致するものは新たな創成面の候補とする。さらに、法線方向が一致する変換後の面の面積 S_{after} と、変換前の創成面の面積 S_{before} 、任意の閾値を t とすると、

$$S_{after} - S_{before} < t \quad (2.3)$$

を満たす場合に創成面と判定する。このようにして、同図 (c) に示す単純形状へと変換した加工プリミティブを取得する。

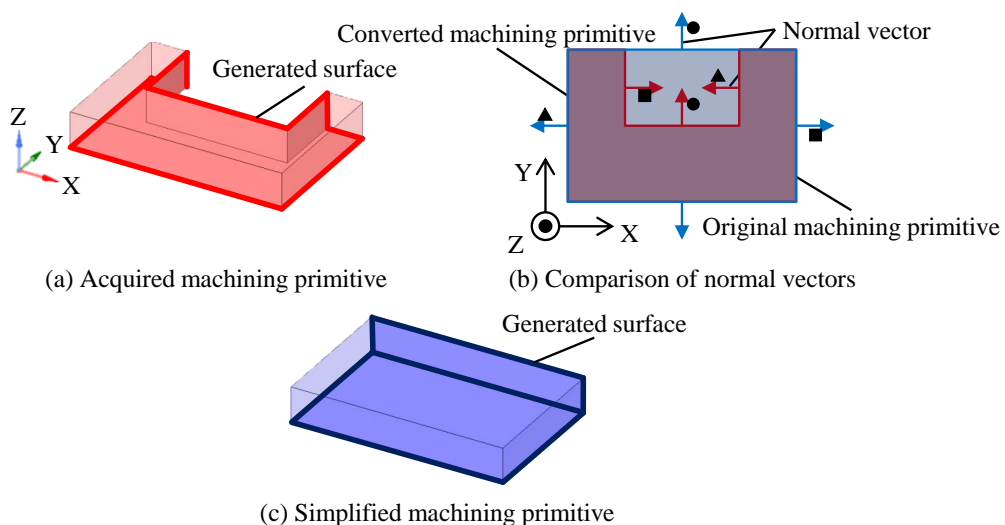


Fig. 2.14 Succession of generated surface of simplified machining primitive

2.6 加工フィーチャの認識

各加工プリミティブの形状と創成面の情報を基に加工フィーチャを認識する．ここで必要となる情報は，加工プリミティブの形状，創成面の数，直方体の加工プリミティブでは対向する創成面の組数，加工プリミティブの穴が創成面であるか否かである¹⁶⁾．複雑形状を円柱や直方体の単純形状へ変換し，創成面の情報を変換後の加工プリミティブへと継承することで，加工プリミティブが円柱と直方体である場合と同様に加工フィーチャを認識することが可能となる．ただし，加工フィーチャ認識のために単純形状へと変換していた加工プリミティブは元の形状へと復元し，2.3 節で取得した面取り箇所や自由曲面などの特定形状部の除去領域となる特殊な加工プリミティブは特別な加工フィーチャとして加工順序の最後に追加する．

例えば，図 2.14 (c) で単純形状へと変換された加工プリミティブは，その形状を直方体として取り扱うことができ，また継承した創成面の情報から，創成面数は 2，対向する創成面の組は無く，穴の創成面も存在しないため，図 2.15 (b) で示すように直方体状の加工フィーチャである (K) Step として認識される．その後，CAM ソフトウェアへの入力を考慮し，加工フィーチャの情報を引き継ぎながら同図 (c) のように元の複雑形状へ復元される．

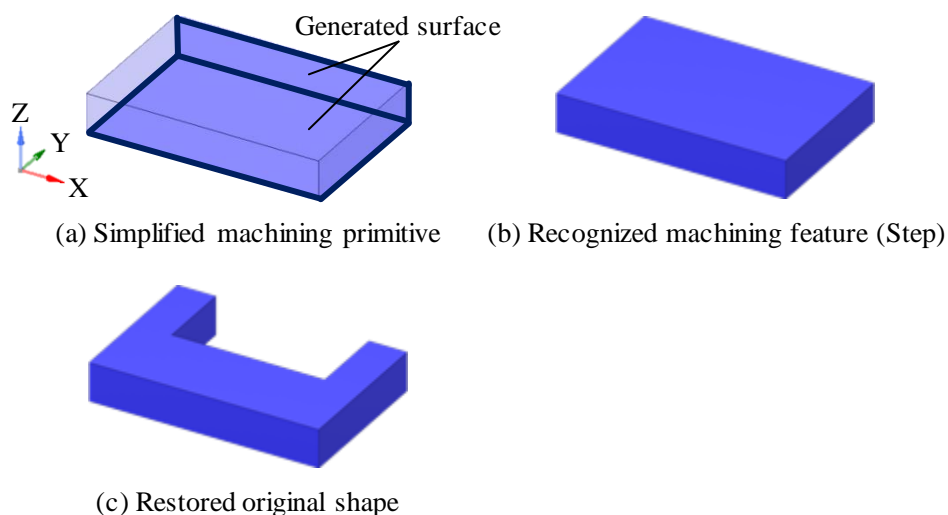


Fig. 2.15 Recognition of machining feature based on simplified machining primitive

2.7 ケーススタディ

本節では、具体例として従来想定されていなかった面取り箇所や自由曲面などの特定形状部を含む製品形状を目標形状として加工フィーチャが認識した。なお、本節では提案手法の基本的な有用性を確認するため、鉛直方向に主軸を有する3軸制御のマシニングセンタによるフライス加工を想定している。入力情報として3次元CADソフトウェアで定義した素材形状と目標形状を図2.16に示す。ここではまず、図2.17に示すように面取り箇所や自由曲面などの特定形状部が目標形状から認識され、それらを取り除くように近似されている。図2.18に近似後の目標形状を示す。この特定形状部を取り除くように近似された目標形状と元の素材形状を新たな入力情報として認識された加工フィーチャを表2.1に示す。

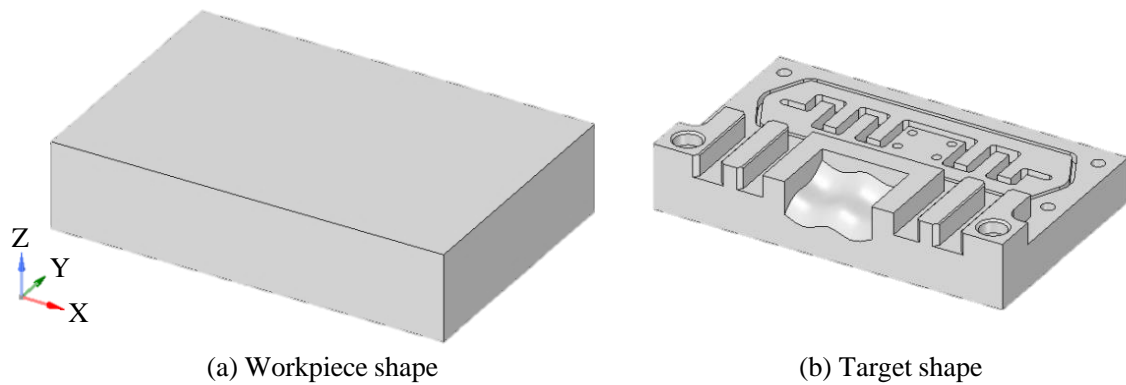


Fig. 2.16 Input data for practical example

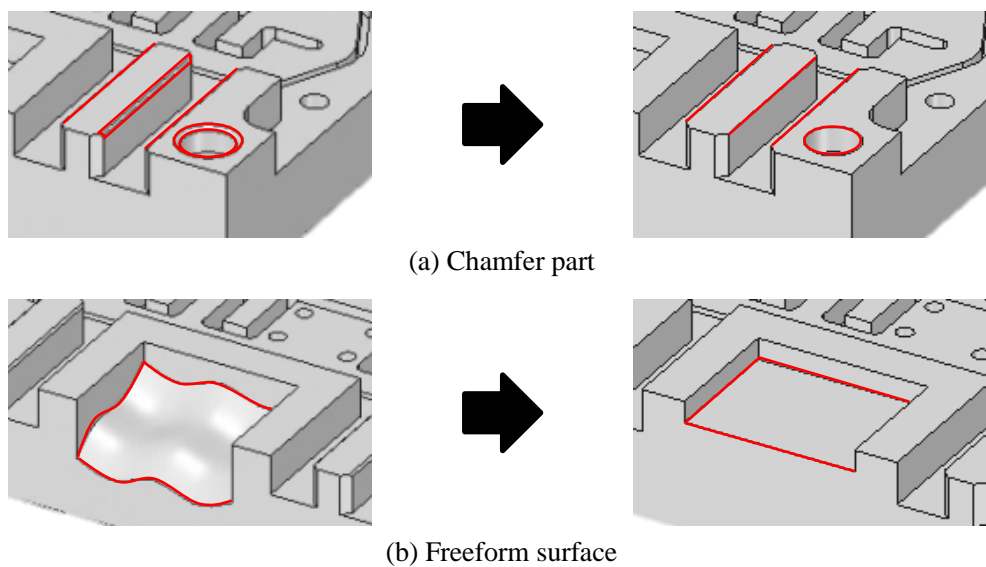


Fig. 2.17 Approximation of chamfer part and freeform surface

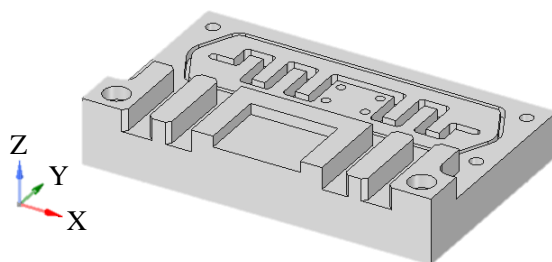
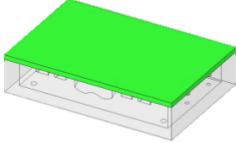
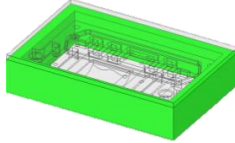
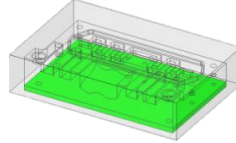
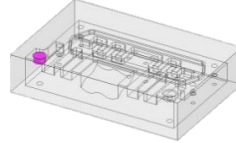
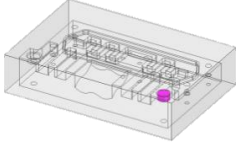
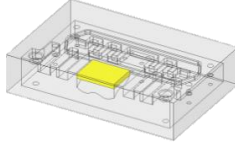
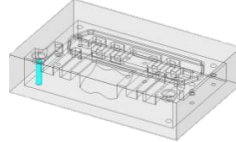
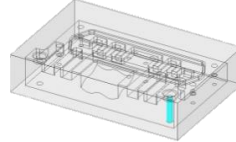
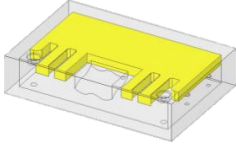
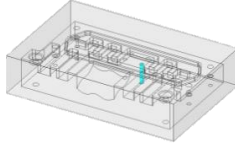
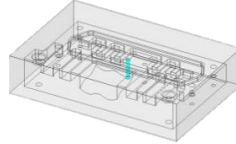
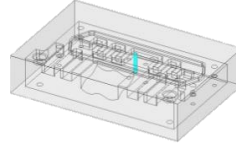
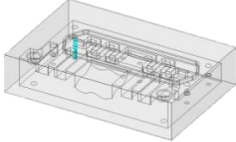
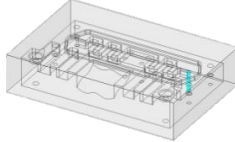
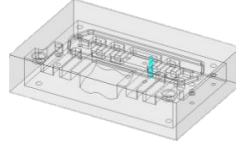
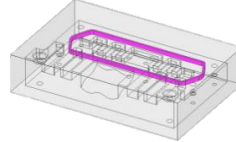
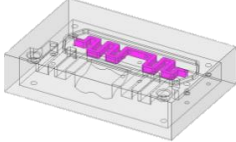
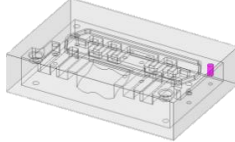
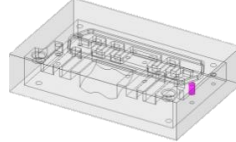
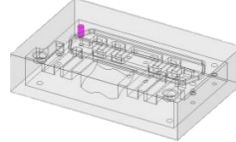
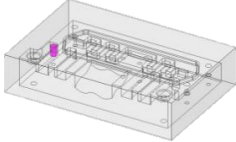
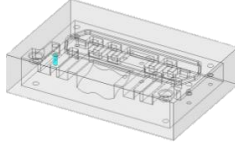
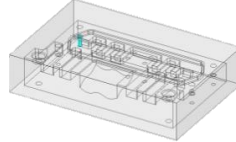
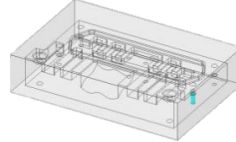
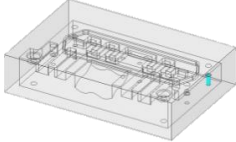
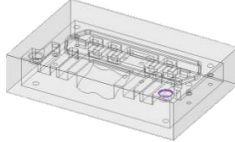
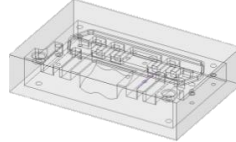
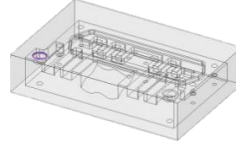
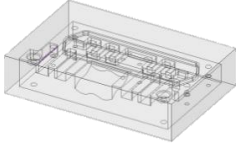
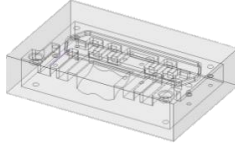
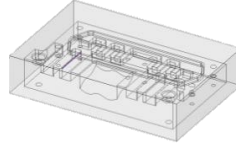
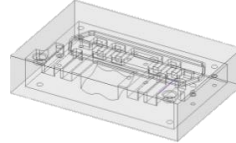
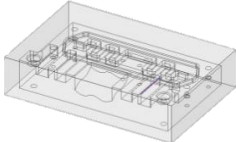
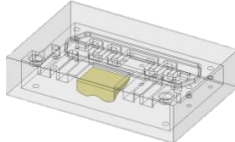


Fig. 2.18 Approximated target shape

Table 2.1 Recognized machining features

1. Face-P 	2. Face-P 	3. Face-P 	4. Blind hole 
5. Blind hole 	6. Closed slot 	7. Through hole 	8. Through hole 
9. Closed slot 	10. Through hole 	11. Through hole 	12. Through hole 
13. Through hole 	14. Through hole 	15. Through hole 	16. Closed pocket 
17. Closed pocket 	18. Blind hole 	19. Blind hole 	20. Blind hole 
21. Blind hole 	22. Through hole 	23. Through hole 	24. Through hole 
25. Through hole 	26. Chamfer 	27. Chamfer 	28. Chamfer 
29. Chamfer 	30. Chamfer 	31. Chamfer 	32. Chamfer 
33. Chamfer 	34. Freeform 		

ここでは複雑形状の加工フィーチャ認識の一例として、加工順序9の加工フィーチャが認識される流れを示す。図2.19 (i) に示す加工プリミティブが取得された後、同図 (ii) のように単純形状としてその加工プリミティブを内包する直方体に変換され、直方体と元の加工プリミティブの創成面を比較し、同図 (iii) に示す Closed slot として加工フィーチャが認識されたいる。その後、認識された加工フィーチャは同図 (iv) のように元の加工プリミティブの形状に復元されている。このように、円柱や直方体で表現される単純形状だけでなく、加工順序9, 16, 17に現れるような複雑形状もそれぞれ加工フィーチャとして認識されることを確認した。また、加工順序26以降では初めに取り除いて近似した面取り箇所と自由曲面部が特殊な加工フィーチャとして追加され、全加工工程は34となった。

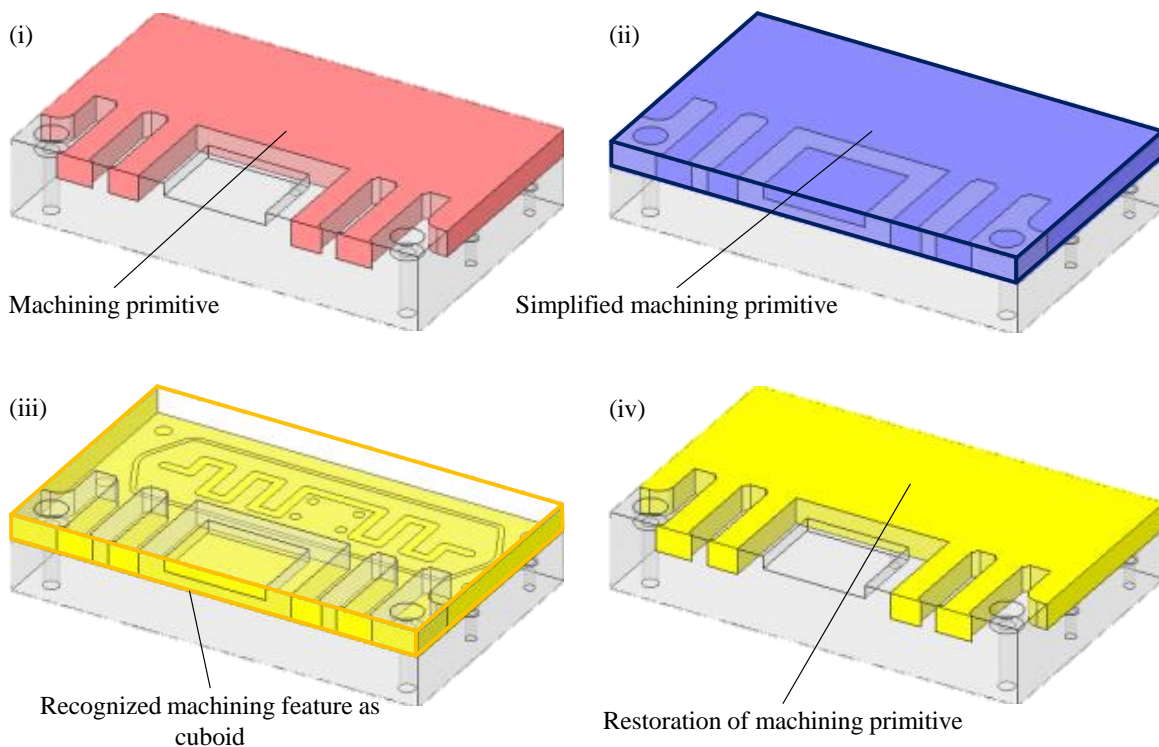


Fig. 2.19 Recognition of complex machining feature

2.8 おわりに

本章では、面取り箇所や自由曲面などの特定形状部が目標形状に含まれる場合や、加工フィーチャが円柱や直方体として表現できない複雑な形状を単純形状へ変換することで、複雑な除去領域から加工フィーチャの認識を可能にする手法について述べた。

2.3 節では面取り箇所や自由曲面などを目標形状から取り除いて近似する処理について述べ、2.5 節では複雑な加工プリミティブを円柱や直方体などの単純形状へと変換して加工フィーチャを認識する処理について述べた。2.7 節で行ったケーススタディの結果から、提案手法が複雑形状を考慮した加工フィーチャの認識に有効であることを確認した。これにより、面取り箇所などは特殊な加工フィーチャとして認識することに加え、加工フィーチャの種類が増大することを避けながら多様な形状の加工プリミティブから加工フィーチャの認識を実現した。

第3章

多軸・複合加工に向けた加工フィーチャ認識

3.1 はじめに

第2章では3軸制御のマシニングセンタを前提として、XY平面に平行な面で分割することで複雑な除去領域から加工フィーチャを認識する手法を述べた。本章では、多様な機械加工のニーズに応えるために多軸化・複合化・多機能化が進む多様な工作機械に対応した工程設計支援システムの開発に向け、直進3軸に加え、回転2軸を有する5軸制御のマシニングセンタや、旋削加工とフライス加工の両機能を有する複合加工機用の工程設計支援システムの開発に向けて加工フィーチャを認識する手法について述べる。

3.2 加工フィーチャ認識の処理

本節では、多軸・複合加工機への対応に向けて、実際にシステム化するための処理について述べる。

CADソフトウェア上で定義した素材形状と目標形状を入力情報として、除去領域を抽出する処理は第2章と同様である。その後、抽出した除去領域と目標形状が接する面を境界面として取得し、XY平面に平行な面に限定することなく、境界面を除去領域内部に拡張する。拡張した境界面と除去領域で囲まれる領域を加工プリミティブと呼ぶ単位形状として取得し、加工プリミティブに対して加工順序を順次設定していくことで加工フィーチャを認識する。

3.2.1 除去領域の抽出

CADソフトウェア上で定義した素材形状と目標形状に対しブーリアン演算を実行することで除去領域を抽出する。ブーリアン演算は図3.1に示すように3次元CADソフトウェアなどで体積を持った形状同士の和・差・積の集合演算により形状を得る方法である。除去領域は素材形状と目標形状の差分領域として得られるため、差のブーリアン演算によって除去領域に相当する領域が得られる。

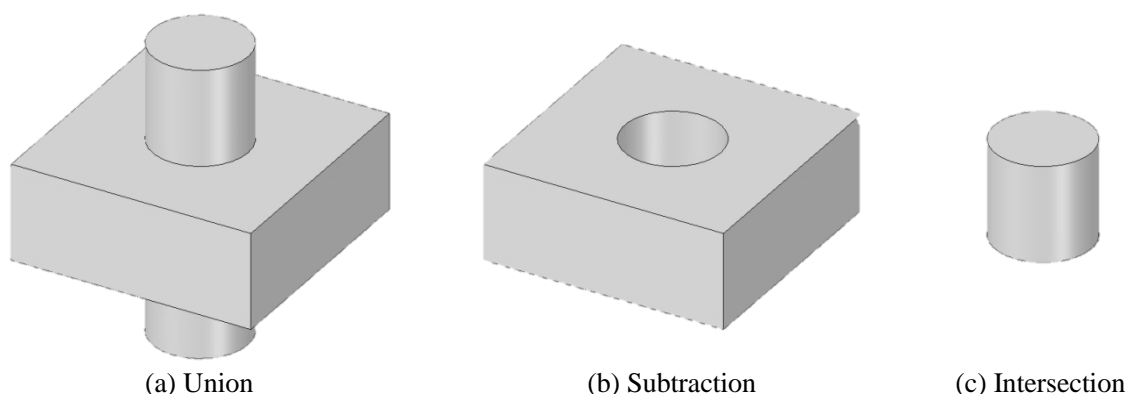


Fig. 3.1 Boolean operations

3.2.2 境界面の取得と拡張

得られた除去領域を構成する面を対象として、これらの面のうち目標形状と接触している面を図 3.2 に示すように境界面として取得する。

次に、同図で示すように得られた境界面を除去領域内部へ拡張するが、素材形状によって変化する除去領域に対して一様に境界面を拡張することは困難である。そこで、ここではまず除去領域の内外を認識させ、拡張すべき面とそうでない部分を分ける必要がある。

除去領域の内外を認識させるためには立体を構成するエッジを利用する。図 3.2 に示すように、境界面を除去領域内部に拡張した場合、拡張されずに残るエッジが存在するが、このエッジは凹エッジとなる。なお、凹エッジはそのエッジを構成する 2 面の法線のなす角が 180° よりも大きくなるエッジのことである。境界面の拡張では、凸エッジを含む箇所のみが変化し、凹エッジは変化しないため、境界面の中から凹エッジを探索することで拡張すべき部分の認識が可能である。ただし、実際に境界面を拡張する処理は後述の加工プリミティブの認識と同時に行うため、ここでは凹エッジを共有する複数の面の組合せとして取得することで図 3.3 に示す拡張すべき面として認識するに留めている。

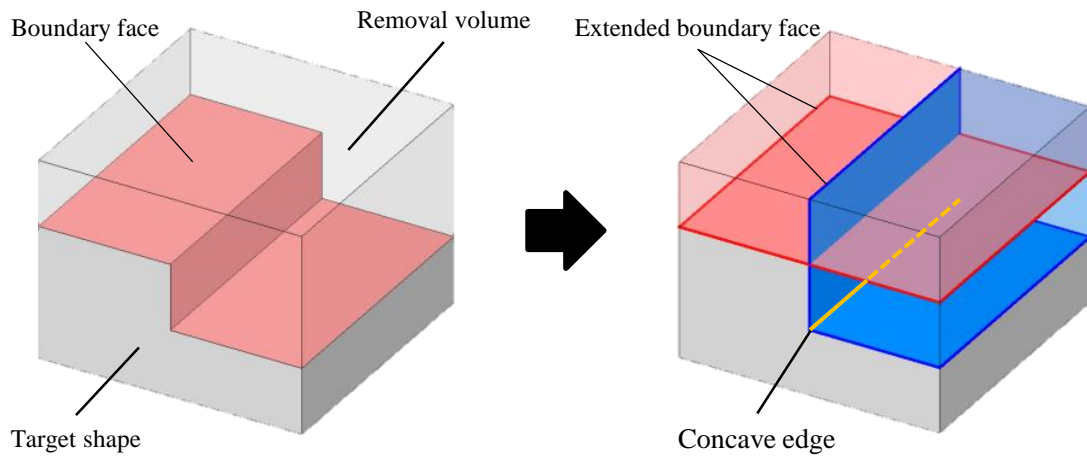


Fig. 3.2 Extension of boundary faces

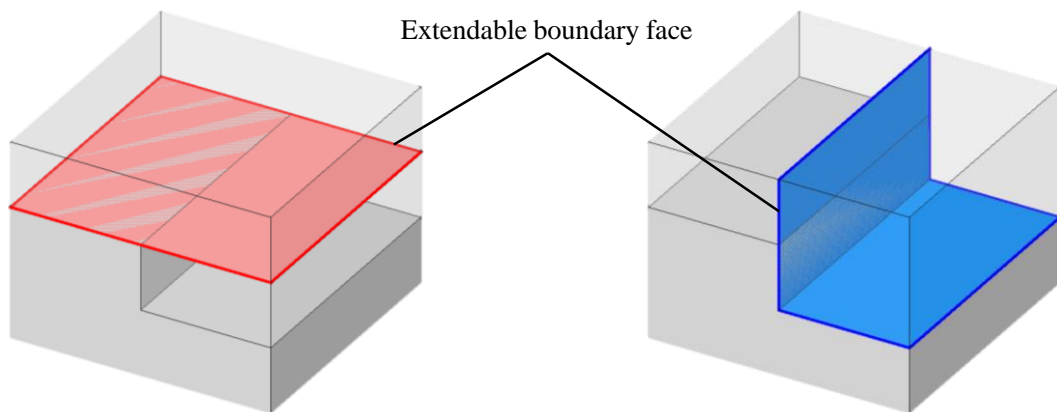


Fig. 3.3 Detection of extendable boundary faces

3.2.3 加工プリミティブの取得

前項で認識した拡張すべき境界面を利用して、CADモデルに対し十分大きくなるように境界面の法線方向に押し出した図 3.4 のような形状を作成する。例えば、境界面が平面の場合には直方体を作成し、円筒面の場合には円柱となる形状を作成する。拡張すべき境界面が複数存在する場合には各面で作成した形状の共通領域となる形状を作成する。作成した形状と除去領域の共通領域が加工プリミティブに相当するため、積のブーリアン演算を実行することで図 3.5 に示す加工プリミティブが得られる。このとき、得られた加工プリミティブが有する面の中で、目標形状と接する面を創成面と呼び、創成面の情報は後述の加工フィーチャを認識する際の指標のひとつとして利用する。

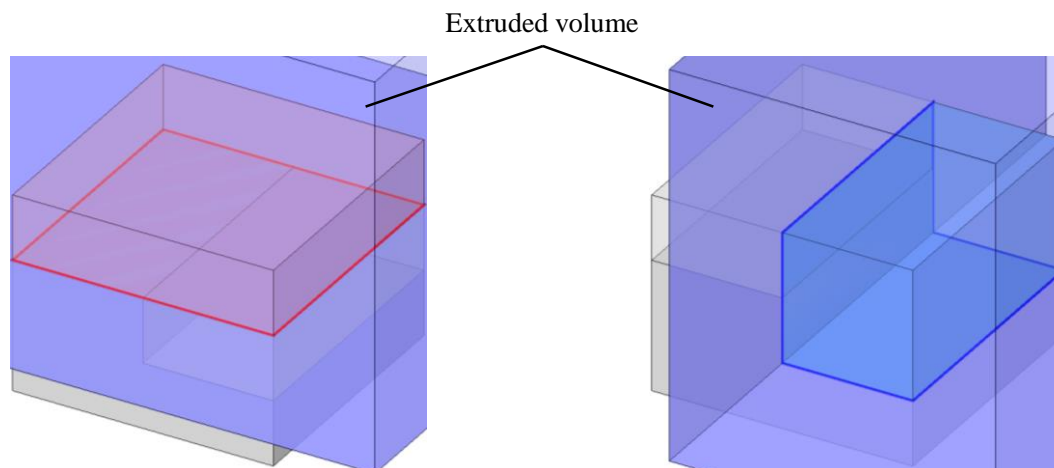


Fig. 3.4 Creation of extruded volume

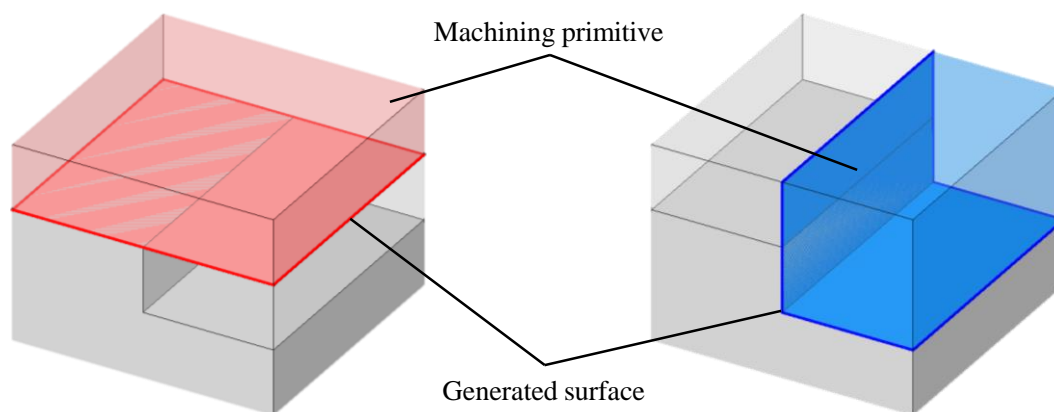


Fig. 3.5 Acquisition of machining primitives and generated surfaces

3.2.4 加工フィーチャの認識

次に、取得された加工プリミティブに加工順序を割り当てながら、創成面の情報を逐次更新する。加工順序の設定条件を任意に変更することで認識される加工フィーチャが変化するため、従来手法よりも自由度の高い加工フィーチャの認識が可能である。

最終的に各加工プリミティブの形状と創成面の情報を基に加工フィーチャを認識する。ここでは、第1章で示した (A) から (D) の4種類と穴を意味する (a) の組合せによって円柱の加工プリミティブを基にした加工フィーチャが認識される。また、(E) から (L) の8種類と穴を意味する (b) の組合せによって直方体の加工プリミティブを基にした加工フィーチャが認識される。円柱の加工プリミティブでは、穴が創成面であるかに加えて、穴以外の創成面の数を用い、直方体の加工プリミティブでは、穴が創成面であるかに加えて、穴以外の創成面の数と、対向する創成面を一組としたときの組数を用いて加工フィーチャを分類する。

3.2.5 加工フィーチャ認識までの処理の様子

具体例として加工フィーチャが認識される様子を示す。入力情報となる素材形状と目標形状を図 3.6 に示し、抽出された除去領域と取得された境界面を図 3.7 に示す。

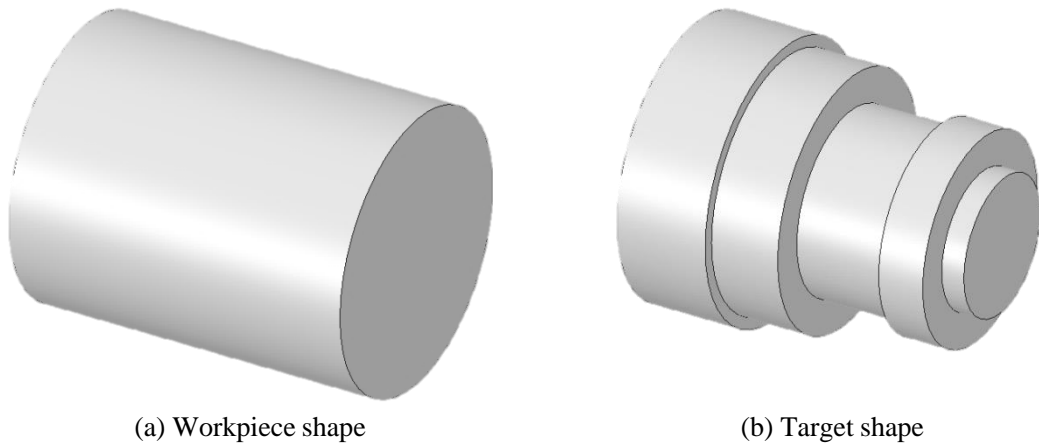


Fig. 3.6 Input data for concrete example

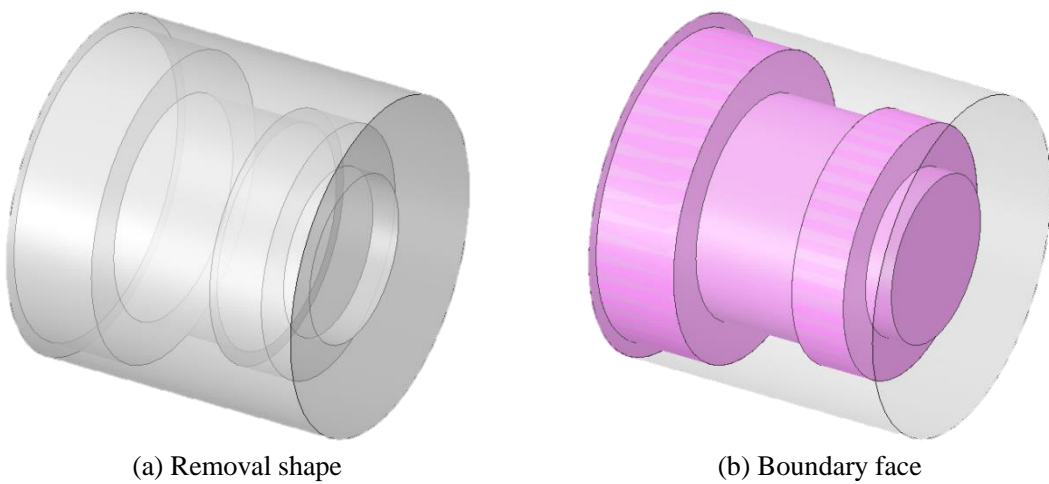


Fig. 3.7 Extracted removal shape and acquired boundary face

次に、境界面を基に取得された加工プリミティブを図 3.8 に示す。ここでは最初に 5 種類の加工プリミティブが取得される。

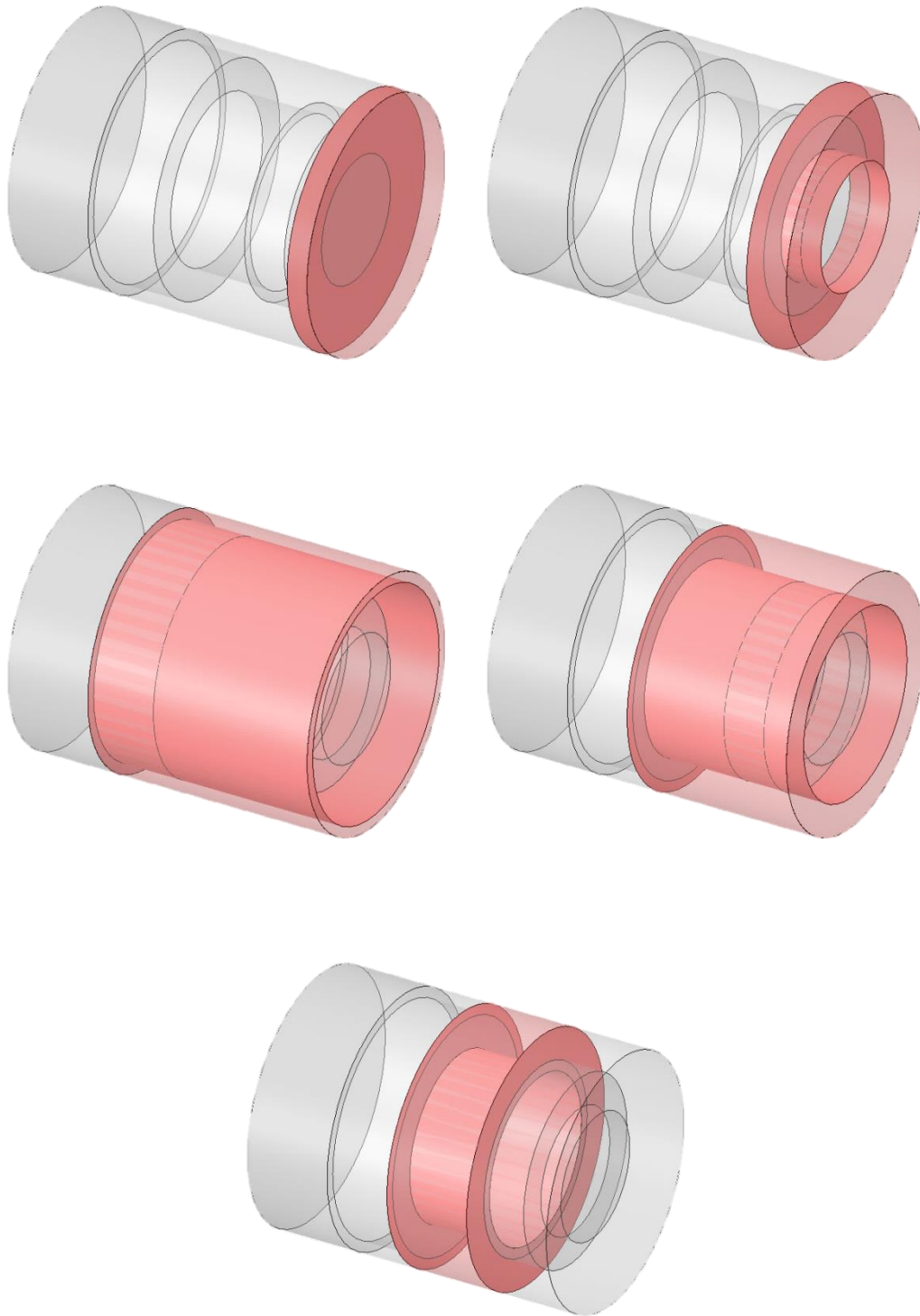


Fig. 3.8 Acquired machining primitives

最後に、加工順序を設定することで加工フィーチャが認識される。ここでは、パターン A として創成面の数が少ないものに先に加工順序を割り当てた場合と、パターン B として体積の大きいものに先に加工順序を割り当てた場合の 2 パターンについて示す。ただし、パターン A で創成面の数が同じ場合には創成面の総面積が大きいものに先に加工順序を割り当てるものとしている。図 3.8 の加工プリミティブの中で条件に適するものを図 3.9 に示す。

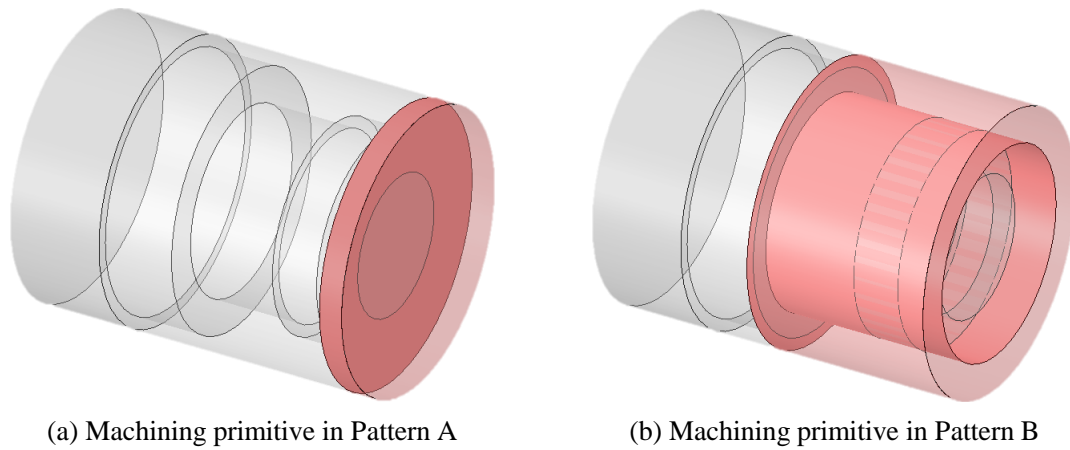
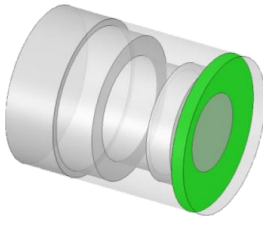
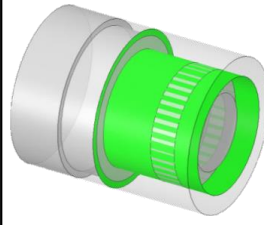
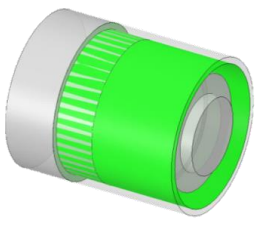
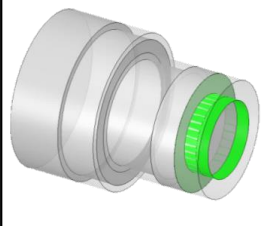
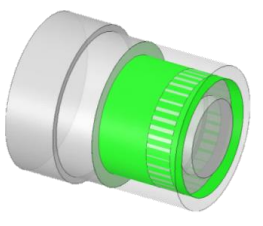
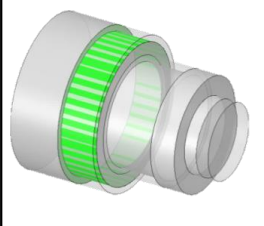
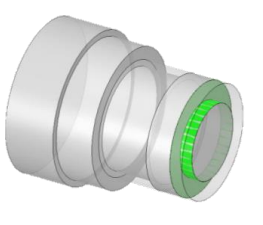
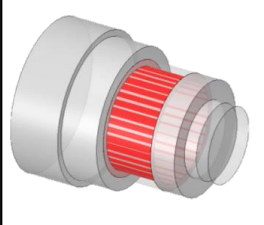
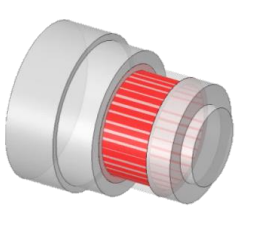
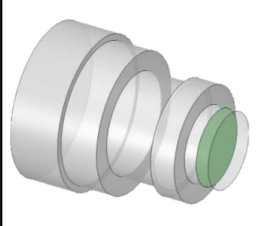


Fig. 3.9 Difference of machining primitives depending on machining order

ここで取得された加工プリミティブがそれぞれのパターンで加工順序1の加工フィーチャとして認識される。加工順序1の加工プリミティブを素材形状から取り除いて素材形状を更新していきながら、順次加工フィーチャを認識する。以上の処理をすべての加工プリミティブに加工順序を割り当てるまで繰り返す。表3.1に各パターンで認識される加工フィーチャを示す。

Table 3.1 Difference of recognized machining features

Pattern A		Pattern B			
Machining sequence	Machining feature	Machining sequence	Machining feature		
	T: Type G: Generated surface A: Area [mm ²]		T: Type G: Generated surface V: Volume [mm ³]		
1		T: (B) G: 1 A: 2827	1		T: (B) + (a) G: 2 V: 49482
2		T: (B) + (a) G: 2 A: 9091	2		T: (B) + (a) G: 2 V: 8836
3		T: (B) + (a) G: 2 A: 5733	3		T: (B) + (a) G: 2 V: 6774
4		T: (B) + (a) G: 2 A: 1355	4		T: (D) + (a) G: 3 V: 6676
5		T: (D) + (a) G: 3 A: 3181	5		T: (B) + (a) G: 2 V: 3534

このように、加工順序の設定条件に従って様々な加工フィーチャを認識することが可能となる。

3.3 ケーススタディ

本節では、多軸・複合加工機に向けた工程設計支援システムのために提案した加工フィーチャ認識手法の有用性を確認するためにケーススタディを行った。ここではまず、複雑な部品形状に対し、5軸制御のマシニングセンタによる割出し加工を想定して加工順序を割り当てて加工フィーチャを認識した。次に、様々な加工方法を考慮可能な複合加工機による加工を想定し、加工順序の設定条件が異なる3つのパターンで加工フィーチャを認識した。

3.3.1 5軸制御のマシニングセンタを想定したパターン

加工順序の設定条件は様々であるが、ここでは複雑な部品形状を5軸制御のマシニングセンタを用いた加工を想定し、工具のアプローチのしやすさを考慮し、創成面の数が少なく、創成面の総面積が大きいものから加工順序を割り当てたパターンA、姿勢を維持するように加工順序を割り当てたパターンBとして加工フィーチャを認識した。ただし、加工プリミティブの創成面のうち、最も面積が大きく、法線を V_{self} 、他の創成面の法線を V_{other} として、加工プリミティブの他の全ての創成面に対して、

$$V_{self} \cdot V_{other} < 0 \quad (3.1)$$

を満たす法線方向を目標形状に干渉しない方向としてその加工プリミティブの方向とした。また、図3.10のように同一方向で創成面を共有する加工プリミティブは1つに結合することとした。

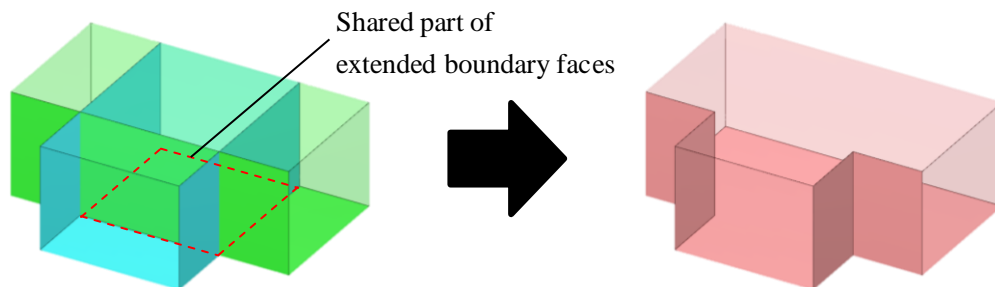


Fig. 3.10 Merged machining primitive with same direction

入力情報の素材形状と目標形状を図3.11に示す。ここではまず、図3.12に示すように目標形状に存在する面取り箇所が取り除いて近似されている。

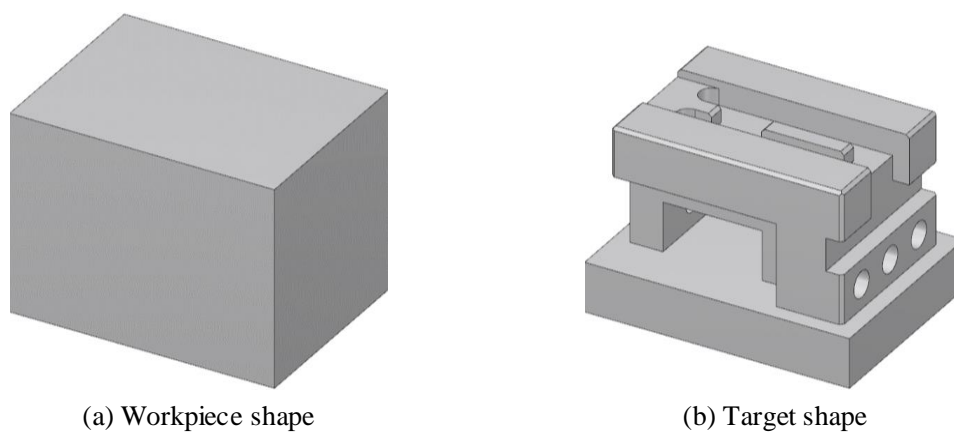


Fig. 3.11 Input information for case study

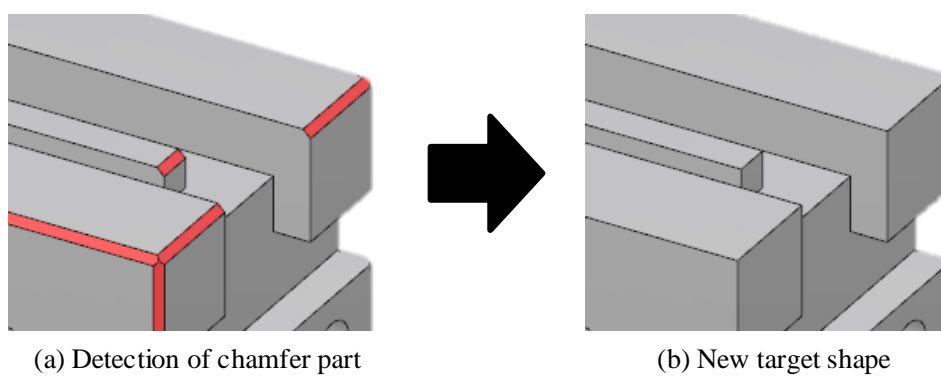
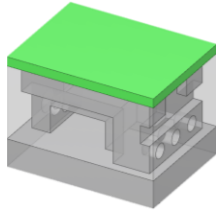
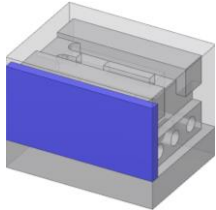
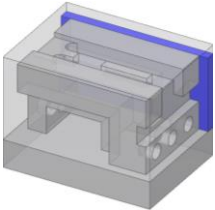
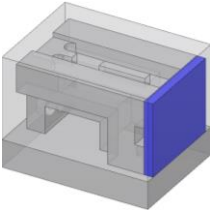
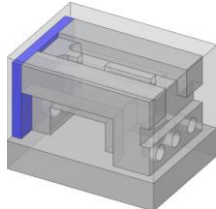
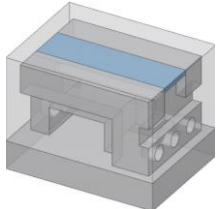
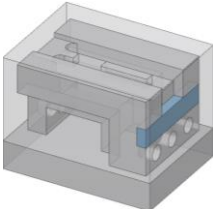
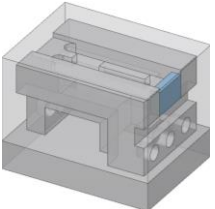
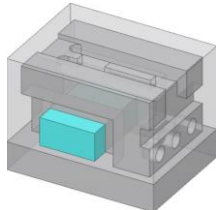
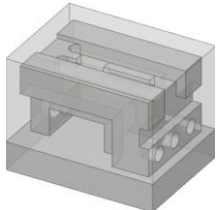
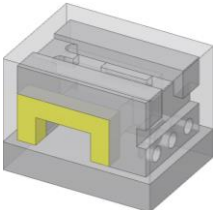
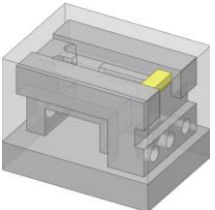
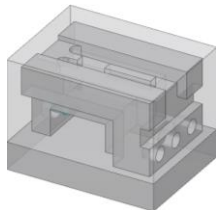
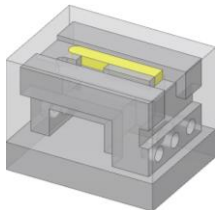
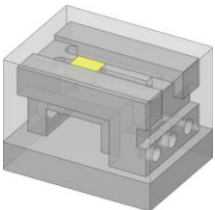
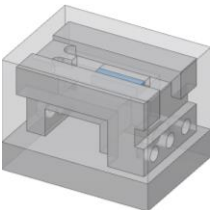
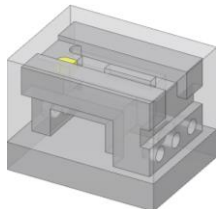
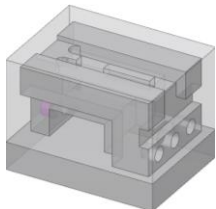
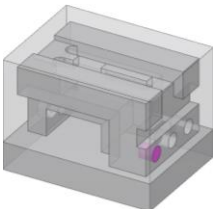
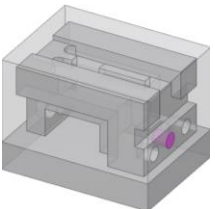
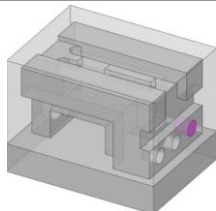
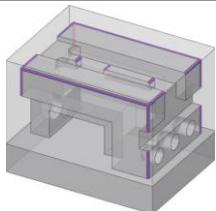


Fig. 3.12 Approximation of target shape

工具のアプローチのしやすさを考慮して創成面の少ないものから加工順序を割り当てたパターンAの結果を表3.2に示す. ここでは21個の加工プリミティブが取得され, 7種類の加工フィーチャが認識されている.

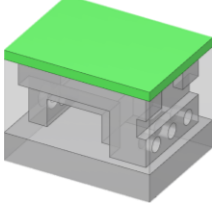
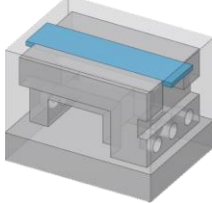
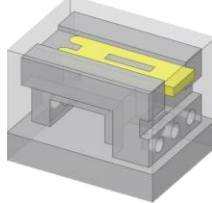
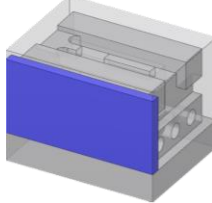
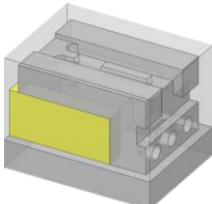
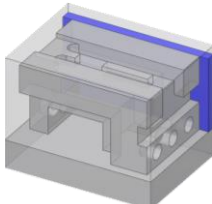
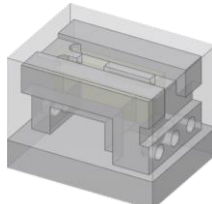
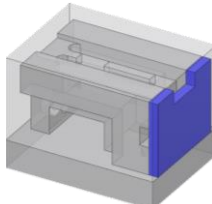
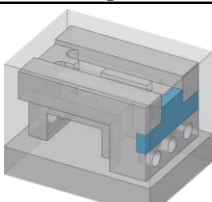
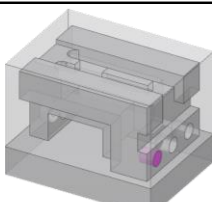
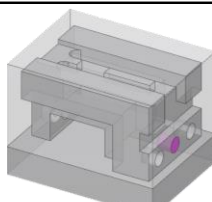
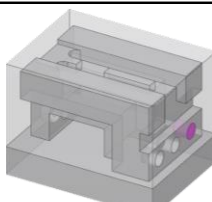
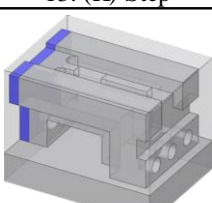
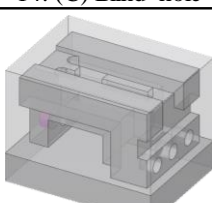
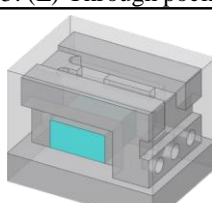
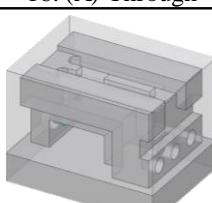
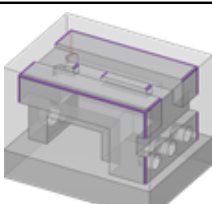
Table 3.2 Recognized machining features in Pattern A

1: (F) Face P	2: (K) Step	3: (K) Step	4: (K) Step
			
5: (K) Step	6: (J) Open slot	7: (J) Open slot	8: (J) Open slot
			
9: (E) Through pocket	10: (L) Closed slot	11: (L) Closed slot	12: (L) Closed slot
			
13: (A) Through hole	14: (L) Closed slot	15: (L) Closed slot	16: (J) Open slot
			
17: (L) Closed slot	18: (C) Blind hole	19: (C) Blind hole	20: (C) Blind hole
			
21: (C) Blind hole	22: Chamfer		
			

一方、割出し加工を想定し、姿勢を維持するように加工順序を割り当てたパターン B の結果を表 3.3 に示す。ここでは、16 個の加工プリミティブが取得され、7 種類の加工フィーチャが認識されている。姿勢を維持するように加工順序が割り当てられている例

として加工順序 1 から 3 や加工順序 8 から 12 など, 同一の姿勢で加工できる加工プリミティブに連続して加工順序が割り当てられている. また, 加工順序 3 や 9 のように円柱や直方体だけでは表現できない加工プリミティブも加工フィーチャとして認識されていることを確認した.

Table 3.3 Recognized machining features in Pattern B

1: (F) Face P	2: (J) Open slot	3: (L) Closed slot	4: (K) Step
			
5: (L) Closed slot	6: (K) Step	7: (L) Closed slot	8: (K) Step
			
9: (J) Open slot	10: (C) Blind hole	11: (C) Blind hole	12: (C) Blind hole
			
13: (K) Step	14: (C) Blind hole	15: (E) Through pocket	16: (A) Through
			
17: Chamfer			
			

3.3.2 複合加工機を想定したパターン

様々な加工方法を考慮可能な複合加工機による加工を想定し，加工順序の設定条件が異なる3つのパターンで加工フィーチャを認識した．想定した複合加工機はNC旋盤にフライス加工の機能を付加したものを想定している．入力情報として素材形状と目標形状を図3.13に示す．

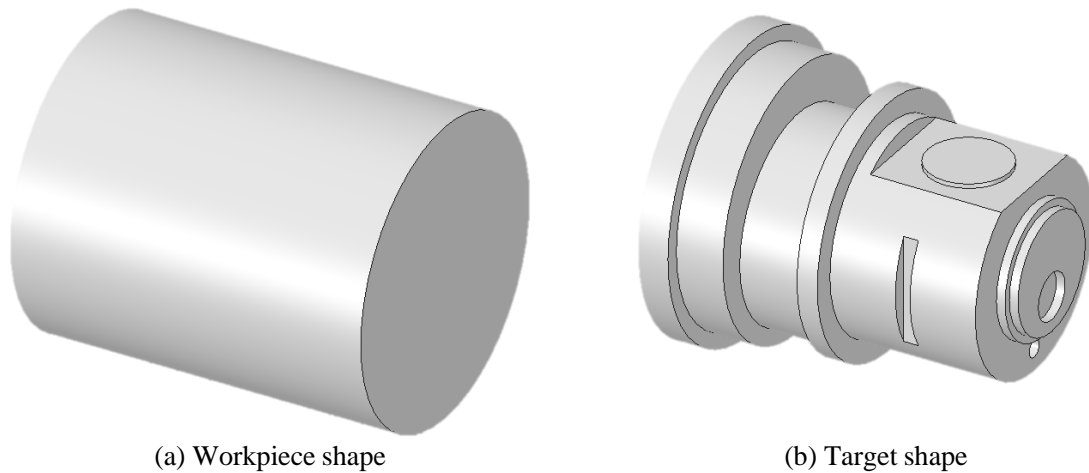
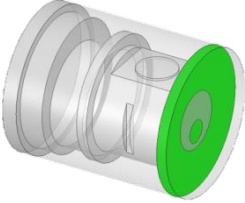
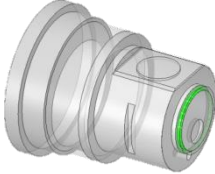
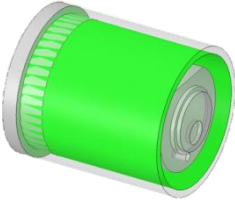
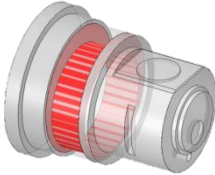
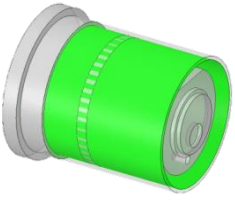
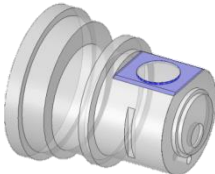
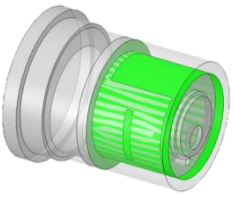
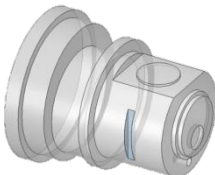
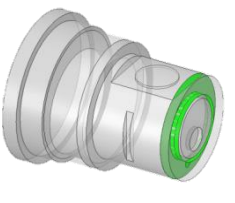
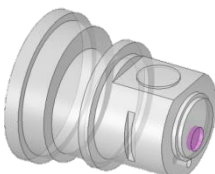
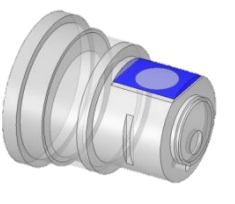
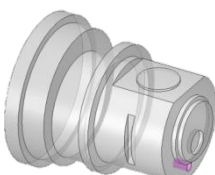


Fig. 3.13 Input information for another case study

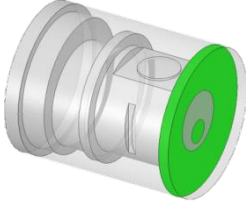
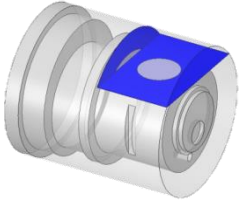
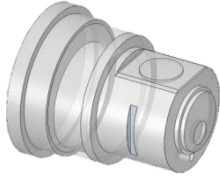
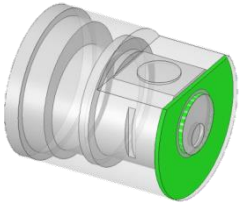
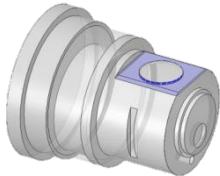
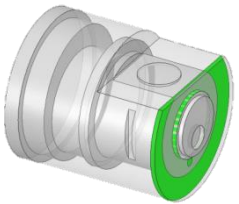
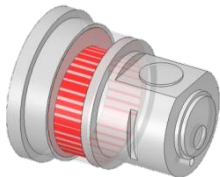
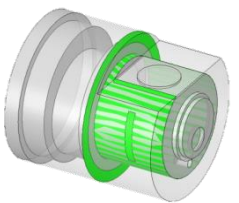
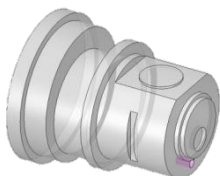
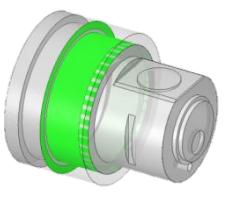
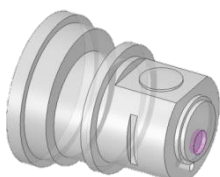
パターン1として，工具が工作物にアプローチしやすいことを想定して加工フィーチャを認識した．具体的には創成面の数が少ない加工プリミティブを優先的に認識し，創成面の数が同じ場合には創成面の総面積が大きいものを優先した．なお，円柱は創成面の数を4として数えている．認識した加工フィーチャを表3.4に示す．

Table 3.4 Recognized machining features in Pattern 1

Machining sequence	Machining feature	Machining sequence	Machining feature
	T: Type G: Generated surface A: Area [mm ²]		T: Type G: Generated surface A: Area [mm ²]
1		7	
	T: (B) G: 1 A: 7854		T: (B) + (a) G: 2 A: 711
2		8	
	T: (B) + (a) G: 2 A: 30615		T: (D) + (a) G: 3 A: 8930
3		9	
	T: (B) + (a) G: 2 A: 23919		T: (K) + (b) G: 3 A: 1335
4		10	
	T: (B) + (a) G: 2 A: 14141		T: (J) G: 3 A: 424
5		11	
	T: (B) + (a) G: 2 A: 3106		T: (C) G: 5 A: 352
6		12	
	T: (K) G: 2 A: 1650		T: (C) G: 5 A: 217

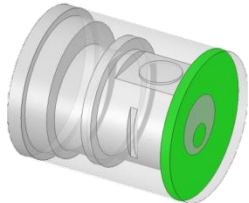
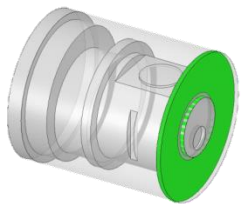
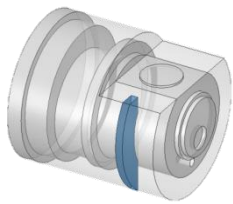
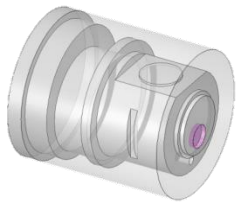
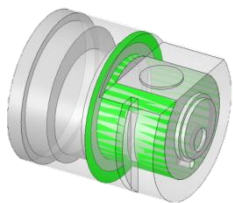
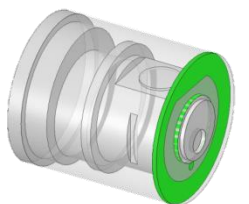
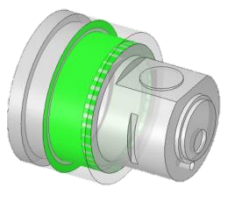
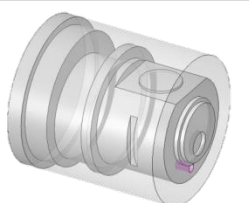
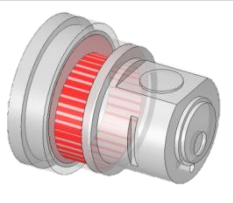
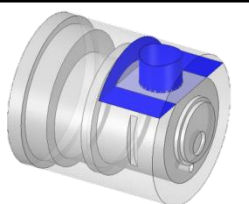
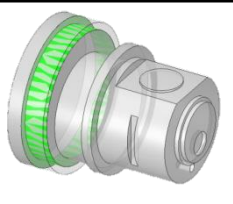
次に、パターン2として工具が工作物にアプローチしにくいことを想定して加工フィーチャを認識した。具体的には創成面の数が少ない加工プリミティブから加工順序を割り当て、創成面の数が同じ場合には総面積が小さいものを優先した。認識した加工フィーチャを表3.5に示す。

Table 3.5 Recognized machining features in Pattern 2

Machining order	Machining feature T: Type G: Generated surface A: Area [mm ²]	Machining order	Machining feature T: Type G: Generated surface A: Area [mm ²]		
				1	
2		T: (B) + (a) G: 2 A: 5120	8		T: (J) G: 3 A: 424
3		T: (F) + (b) G: 2 A: 5896	9		T: (K) + (b) G: 3 A: 1335
4		T: (F) + (b) G: 2 A: 5609	10		T: (D) + (a) G: 3 A: 8930
5		T: (B) + (a) G: 2 A: 13386	11		T: (C) G: 5 A: 217
6		T: (B) + (a) G: 2 A: 10458	12		T: (C) G: 5 A: 352

最後に、パターン3として良好な加工精度が得られると予想される、チャック位置から遠いものを優先して加工フィーチャを認識した。チャック位置からの距離は、加工加工プリミティブの重心位置で判断している。認識した加工フィーチャを表3.6に示す。

Table 3.6 Recognized machining features in Pattern 3

Machining order	Machining feature T: Type G: Generated surface X: Center of gravity [mm]	Machining order	Machining feature T: Type G: Generated surface X: Center of gravity [mm]		
				1	
2		T: (B) + (a) G: 2 X: 112	8		T: (J) G: 3 X: 82
3		T: (C) G: 5 X: 112	9		T: (B) + (a) G: 2 X: 81
4		T: (B) + (a) G: 2 X: 109	10		T: (B) + (a) G: 2 X: 42
5		T: (C) G: 5 X: 102	11		T: (D) + (a) G: 3 X: 38
6		T: (K) + (b) G: 3 X: 85	12		T: (B) + (a) G: 2 X: 18

様々な加工方法を選択可能な複合加工機を用いた場合であっても、加工順序の設定条件を変更することで、パターン1から3のように様々な加工フィーチャを認識することができ、任意の加工工程を選択することが可能となる。

さらに、パターン1から3で認識された加工フィーチャを基に市販のCAMソフトウ

エア (DP technology 製 ESPRIT) により工具経路を生成して加工時間を算出した。工具は外形と端面旋削用バイト, フライス加工用に 5 種類のスクエアエンドミル ($\phi 4, 6, 8, 10, 25 \text{ mm}$), 2 種類のドリル ($\phi 6, 10 \text{ mm}$) を想定し, 旋削加工とフライス加工の両方で加工可能な場合は旋削加工とした。また, 切削条件は使用した工具のカタログから, 非鉄金属の推奨条件を適用し, エンドミルは加工プリミティブの幅以下となる最大径のものを選択した。算出された加工時間を表 3.7 に示す。ここでは加工時間を評価指標とすることで, 作業者は複数パターンで認識された加工フィーチャの中から, 意向や加工戦略に沿った加工工程案を選択することが可能になる。

Table 3.7 Calculated machining time

	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
Time [min]	16.2	17.9	18.4

3.4 加工実験

本研究で開発したシステムにより認識した加工フィーチャに基づいて工程設計を施すことで加工実験を行い, 工程設計支援システムの有用性を確認した。ここでは 3.3.2 項で実施したケーススタディのうち, 加工時間が最短となる場合を想定し, 工具のアプローチのしやすさに着目したパターン 1 に対して実際に工程設計を施した。

3.4.1 使用した工作機械

加工実験では図 3.14 に示すヤマザキマザック製の複合加工機である INTEGREX i-200 を用いた。軸構成は図 3.15 に示すように, 旋削主軸とミリング主軸を有しており, 旋削主軸側に回転 1 軸 (C 軸), ミリング主軸側に X, Y, Z の直進 3 軸と回転 1 軸 (B 軸), および芯押し台の W 軸で構成される。仕様を表 3.8 に示す。



Fig. 3.14 INTEGREX i-200

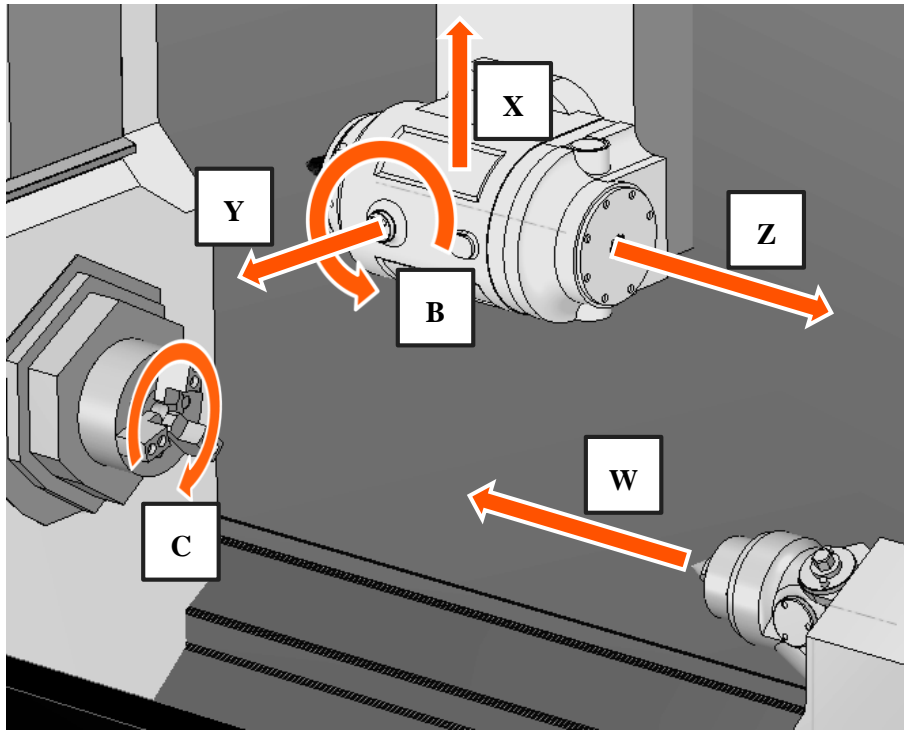


Fig. 3.15 Construction of INTEGREX i-200

Table 3.8 Specification of INTEGREX i-200

Specification		Bed Length – 1000U in
Capacity	Maximum Swing	658 mm
	Maximum Machining Diameter	658 mm
	Maximum Bar Work Capacity	65 mm
	Maximum Machining Length	1011 mm
Main Spindle	Chuck Size	8 in
	Maximum Speed	5000 rpm
	Motor Output (30 minute rating)	22 kw
Milling Spindle	B-Axis Travel	240°
	Magazine Capacity	36
	Maximum Speed	12000 rpm
	Motor Output (20 ED Rating)	22 kw
Feed Axes	Travel (X Axis)	615 mm
	Travel (Y Axis)	260 mm
	Travel (Z Axis)	1077 mm

3.4.2 工程設計と工具経路生成

図 3.16 および図 3.17 に加工で想定する素材形状と目標形状を示す。これらを入力情報として認識された加工フィーチャを基に工程設計を施した結果を表 3.9 に示す。加工実験で使用した工具は外形と端面旋削用バイト，フライス加工用に 5 種類のスクエアエンドミル ($\phi 4, 6, 8, 10, 25 \text{ mm}$)，2 種類のドリル ($\phi 6, 10 \text{ mm}$) を想定し，旋削加工とフライス加工の両方で加工可能な場合は旋削加工を優先した。また，切削条件は使用した工具のカタログから，非鉄金属の推奨条件を適用し，フライス工具は加工プリミティブの幅以下となる最大径の工具を使用した。

工具経路の生成には複合加工機にも対応している DP Technology 製の CAM ソフトウェア ESPRIT を用いた。ESPRIT に加工に使用した複合加工機 INTEGRIX i-200 の機械情報とポストプロセッサを取り込み，3 次元 CAD で作成した目標形状に任意の除去領域と加工箇所を設定し，工具や加工方法を指定することで NC データを出力した。

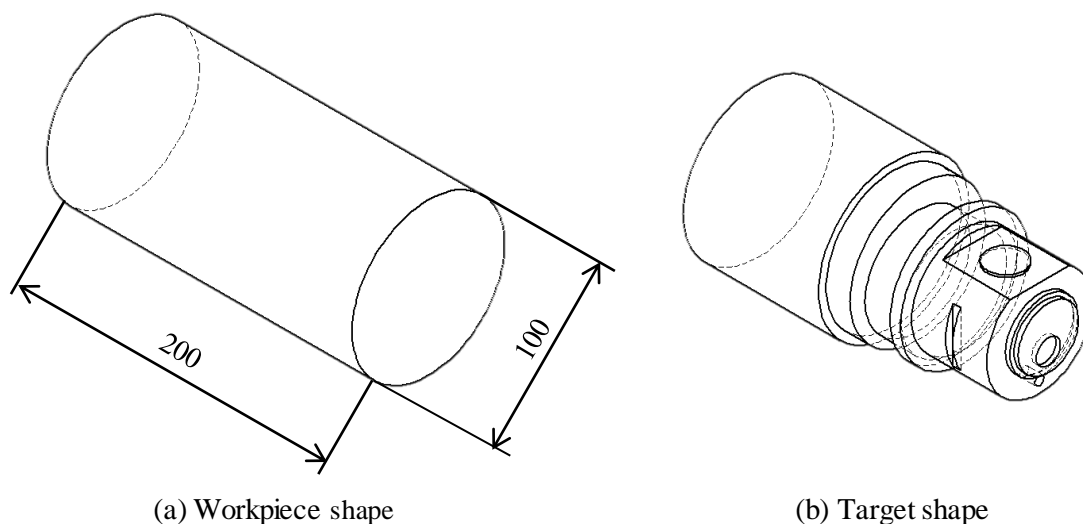


Fig. 3.16 Input information for machining experiment

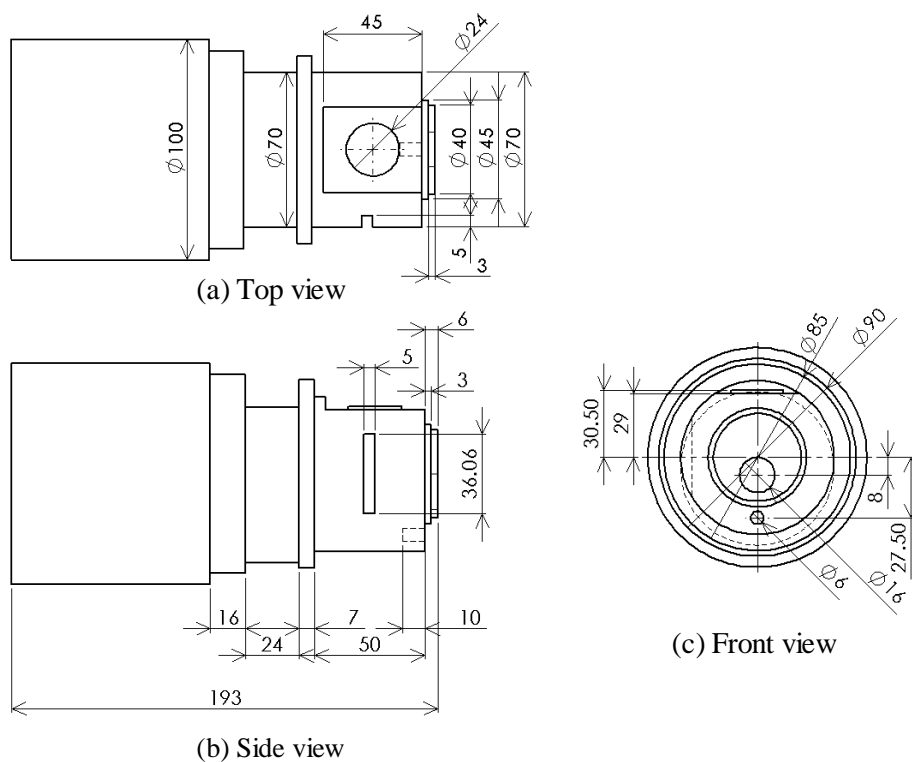


Fig. 3.17 Dimension of target shape

Table 3.9 Result of process planning

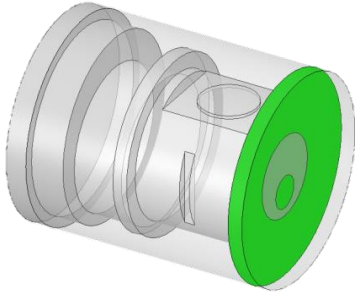
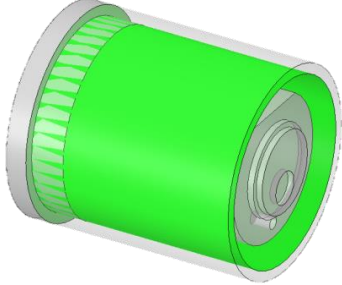
Machining sequence		Cutting conditions	
1		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) 1 7854 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm
2		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 30615 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm

Table 3.9 Result of process planning (cont.)

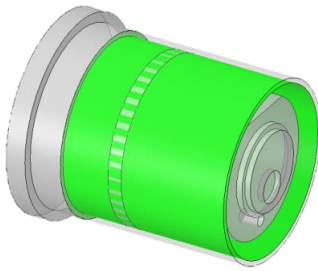
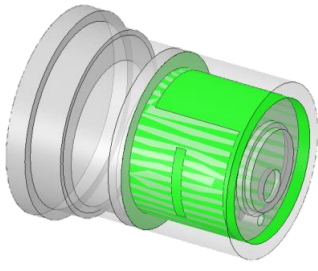
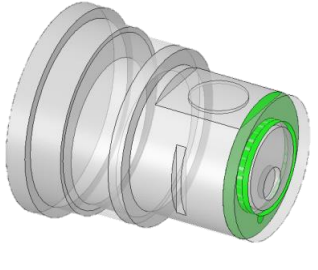
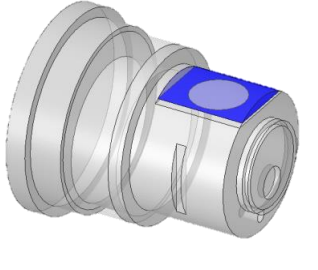
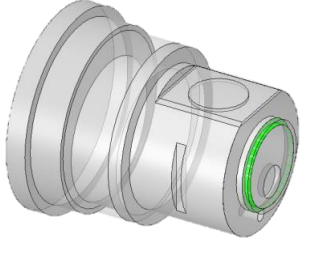
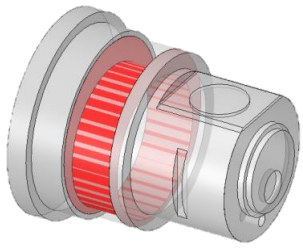
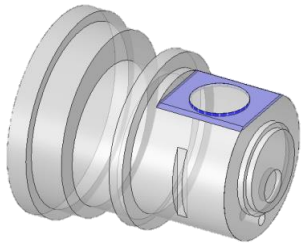
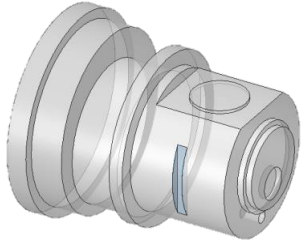
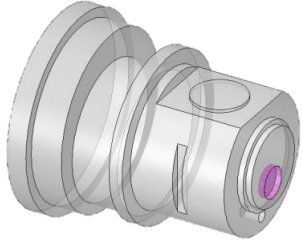
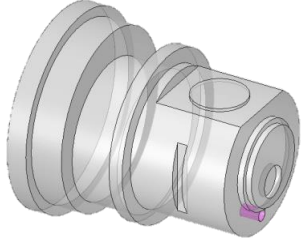
Machining sequence		Cutting conditions	
3		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 23919 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm
4		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 14141 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm
5		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 3106 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm
6		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(K) 2 1650 mm ² Milling End mill 1000 mm/min 2000 rpm 3 mm 25 mm
7		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 711 mm ² Turning Bite 125 mm/min 500 rpm 3 mm

Table 3.9 Result of process planning (cont.)

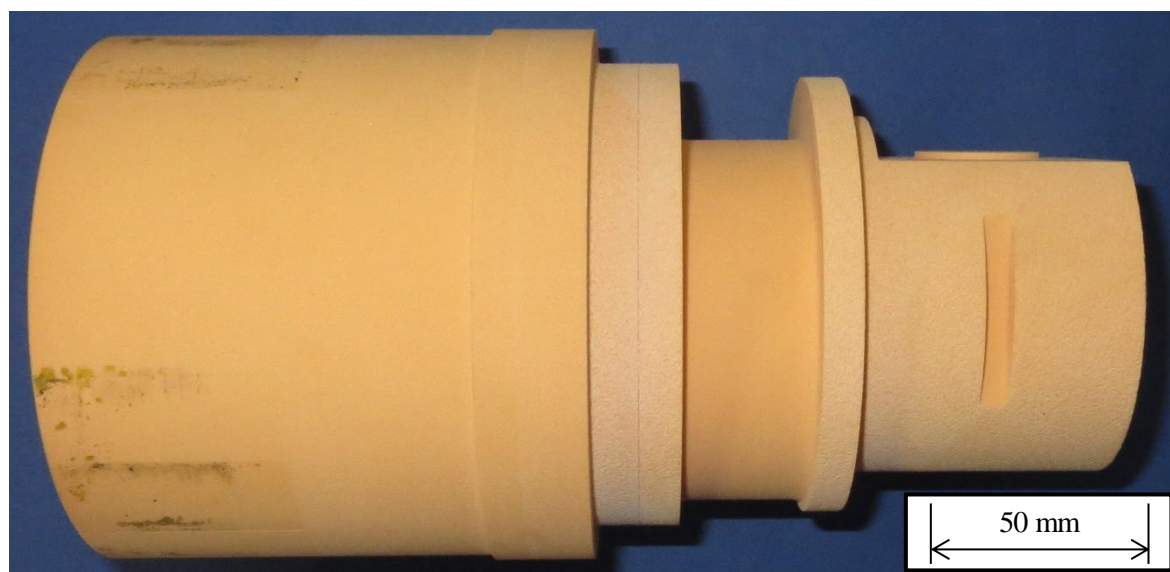
Machining sequence		Cutting conditions	
8		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(D) + (a) 3 8930 mm ² Turning - Milling End mill 125 - 1000 mm/min 500 - 2000 rpm 3 mm 8 mm
9		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(K) + (b) 3 1335 mm ² Milling End mill 1000 mm/min 2000 rpm 3 mm 8 mm
10		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(J) 3 424 mm ² Milling End mill 1000 mm/min 2000 rpm 3 mm 1 mm
11		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(C) 5 352 mm ² Milling End mill 1000 mm/min 2000 rpm 3 mm -
12		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(C) 5 217 mm ² Drilling Drill 65 mm/min 650 rpm - -

3.4.3 加工結果

前項で施した工程設計に基づいて加工した結果を図 3.18 に示す。なお、材質はケミカルウッド SB0470 を使用した。認識された加工フィーチャを基に施した工程設計に従って加工した結果、干渉を起こすことなく想定された形状を加工できることを確認した。

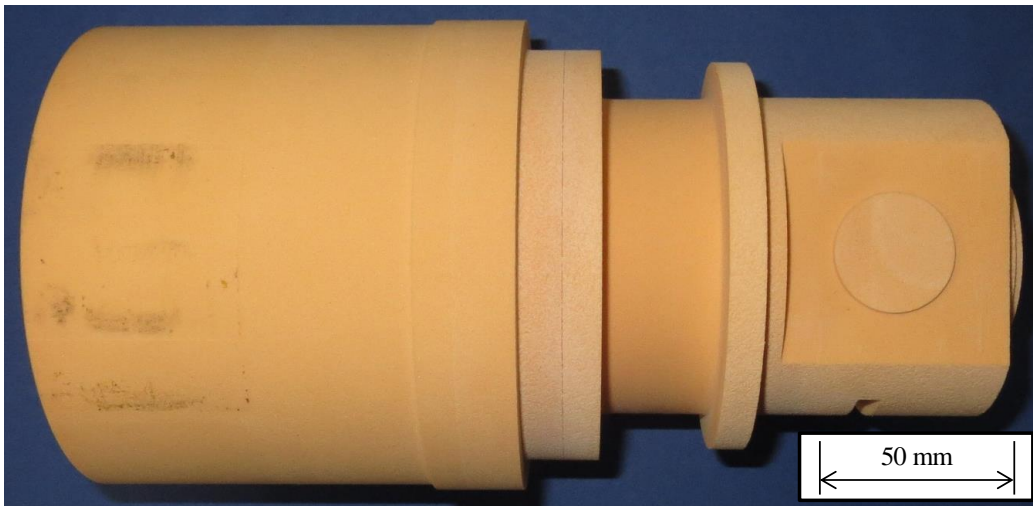


(a) Front view



(b) Side view

Fig. 3.18 Result of machining experiment



(c) Top view



(d) Whole view

Fig. 3.18 Result of machining experiment (cont.)

3.5 おわりに

本章では、多軸・複合加工機へと加工フィーチャ認識手法を拡張する処理について述べた。第2章ではXY平面に平行な面で分割することで加工プリミティブを取得し、加工フィーチャを認識していたが、特定の面に限定することなく、境界面を拡張することで加工プリミティブを取得することで、多軸・複合加工機で加工される形状に対して加工フィーチャを認識した。提案手法の有用性を確認するための複数のケーススタディでは、5軸マシニングセンタによる割出し加工を想定し、加工する姿勢を維持するように加工順序を設定することで加工フィーチャを認識することに加え、様々な加工方法が選択可能な複合加工機に対して、加工順序の設定条件を変更することで様々なパターンで加工フィーチャの認識を実現した。また、認識した加工フィーチャに基づいて実際に工程設計を施し、複合加工機を用いて加工実験を実施し、干渉を起こすことなく想定した形状が得られることを示した。

第4章

複合加工機の機能を活かす工程設計

4.1 はじめに

第3章では、実用的な製品形状を想定し、多軸・複合加工機に対応した加工フィーチャ認識手法について述べた。一方、近年ではメインとなる第1旋削主軸やミリング主軸に加え、第2旋削主軸や刃物台タレットを有する複合加工機が登場しており、これらの複合加工機を用いた更なる効率的な加工が期待される。そこで本章では、より多機能な複合加工機に対応した工程設計支援システムの開発に向け、第2旋削主軸を用いた工作物の把持替えと刃物台タレットを用いた複数箇所の同時加工を実現するための加工フィーチャ認識手法について述べる。

4.2 複雑な構造を有する複合加工機への対応

ここまで、複合加工機として旋削主軸を1つのみ有する場合を想定して加工フィーチャを認識した。しかし、近年ではさらに高い生産性を得るために、図4.1に示すような第2旋削主軸や旋削主軸下側に刃物台タレットを有するような多様な複合加工機が登場している。そこで、より多機能な複合加工機の機能を活用するため、第2旋削主軸を用いた工作物の把持替えや、下側刃物台タレットを用いた複数箇所の同時加工を想定した加工フィーチャの認識手法を提案する。

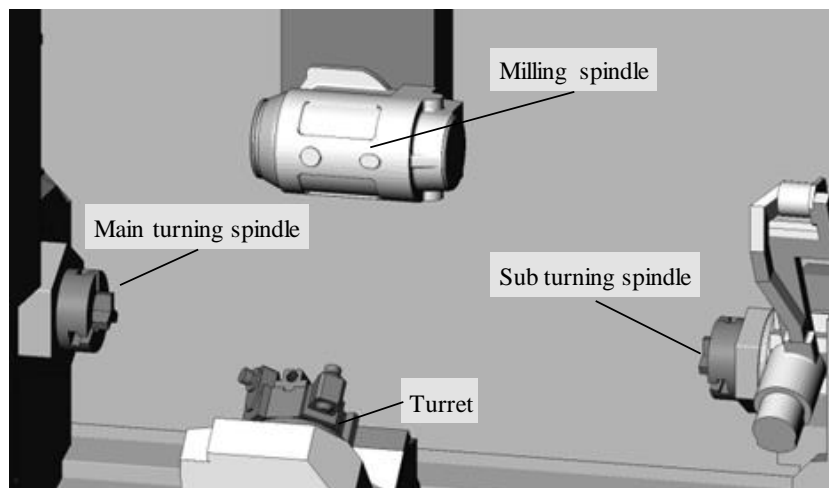


Fig. 4.1 Construction of multi-tasking machine tool having sub turning spindle and a turret

把持替えと同時加工を考慮した工程設計支援システムにおける処理の流れを図 4.2 に示す。太線で囲まれた処理が特に本研究で新たに加えた処理である。なお、本章では NC 旋盤にマシニングセンタの機能を加えた形式の複合加工機を想定し、工作機械の機械座標系と CAD モデルの座標系は一致するものとしている。

これまでの研究では把持替えや同時加工は想定されていないため、まず把持替えのために加工領域を分割する。その後、上野らの手法に基づき加工フィーチャの認識を自動的に行うシステムを構築する。最後に、認識された加工フィーチャから同時に加工できるものを選択することで同時加工を考慮する。各処理についていくつかの節に分けて述べる。

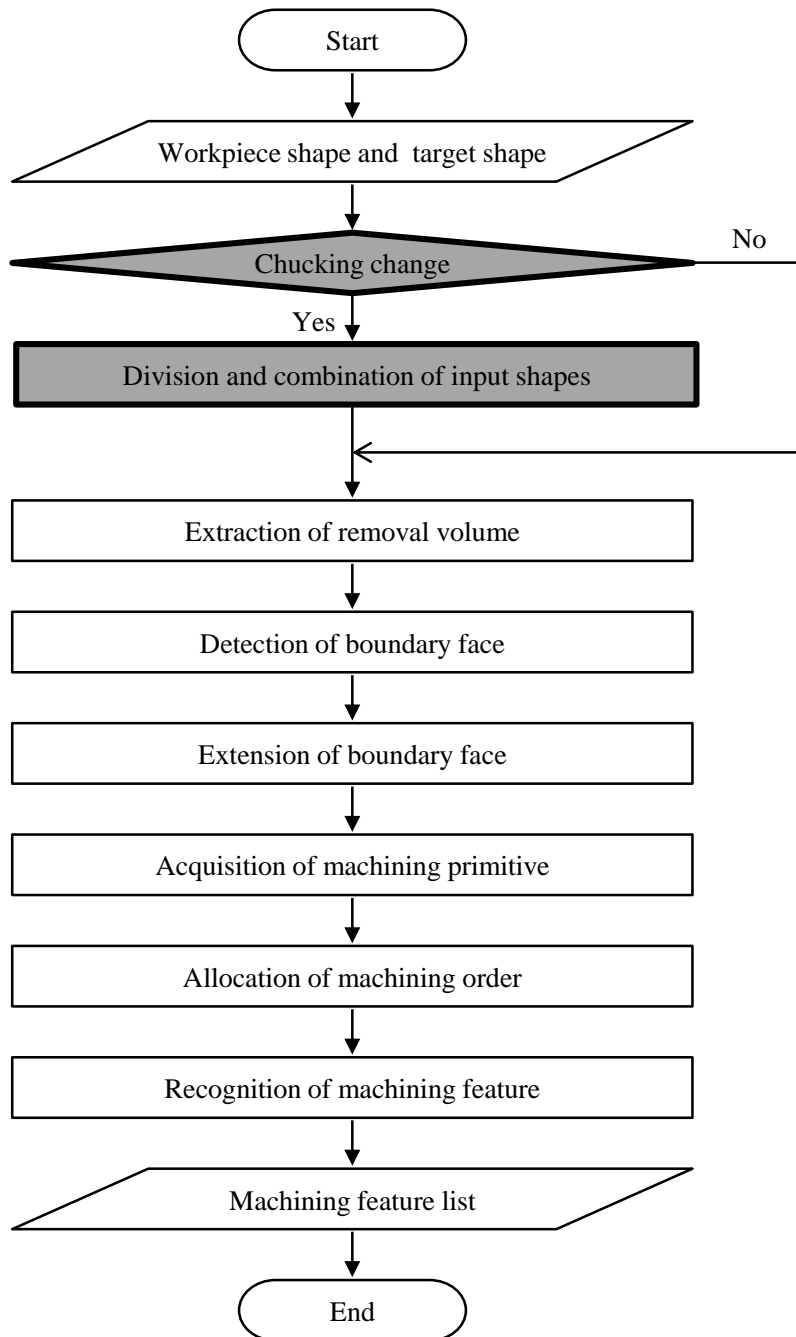


Fig. 4.2 Flow chart of developed system

4.3 把持替えを考慮した加工フィーチャ認識

前述のように、先行研究では2つの旋削主軸を有する複合加工機は想定していない。そのため、把持替えを想定する場合には第1旋削主軸側と第2旋削主軸側で加工フィーチャを認識するための領域を分割して考える必要がある。そこで、本節では把持替えを行うために加工領域を分割する処理について述べる。

まず、CADソフトウェア上で定義された図4.3に示すような素材形状と目標形状のうち、目標形状を加工領域の分割に利用する。図4.4(a)に示すように目標形状を構成する面の中で法線が旋削主軸に平行となる面を取得する。次に取得された各面をそれぞれ内包する最小の長方形を同図(b)のように定義する。ここでは常に最大径の箇所を把持することを想定し、定義した長方形のうち面積が最大で、より原点に近い面を図4.5のように切断面として取得する。最後に、取得された切断面で図4.6に示すように素材形状と目標形状を分割し、図4.7のように素材形状の第2旋削主軸側と目標形状の第1旋削主軸側のように互いに再結合することで新たな目標形状を再定義する。再定義した2つの領域を第1旋削主軸側、第2旋削主軸側の新たな目標形状として、初めにCADソフトウェア上で定義した素材形状と共に新たな入力情報とする。各主軸側でそれぞれ加工フィーチャ認識することで把持替えを考慮することが可能となる。

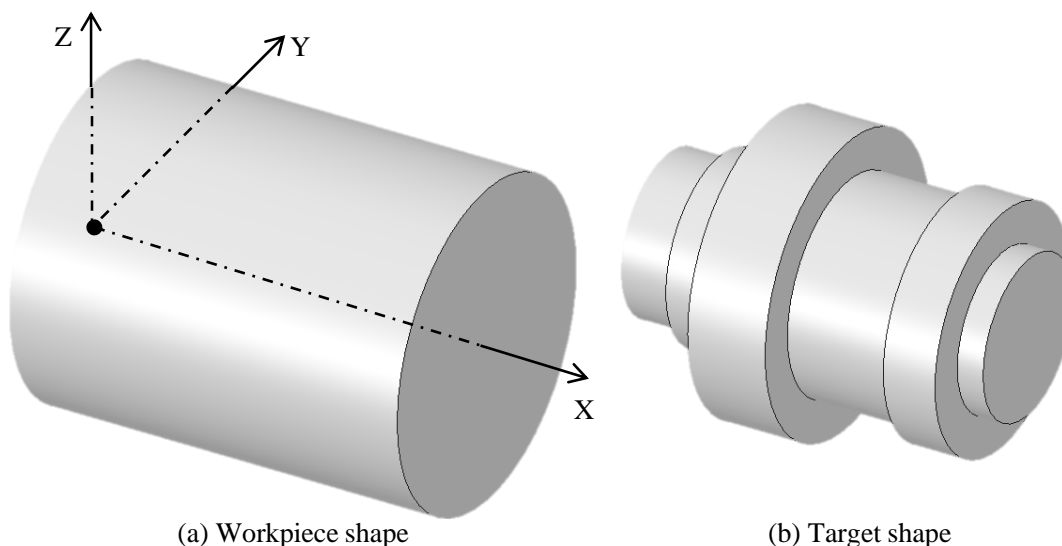
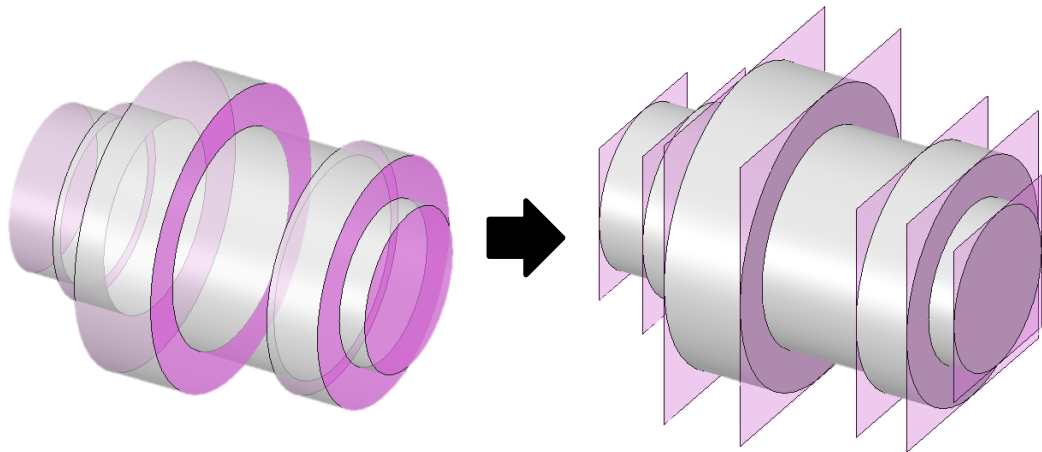
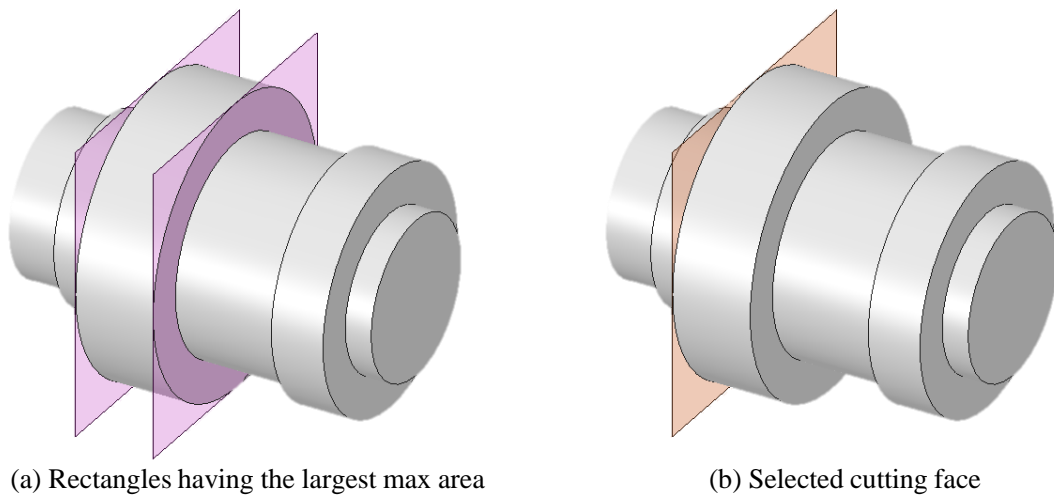


Fig. 4.3 Input information



(a) Detection of parallel faces to turning axis (b) Definition of rectangles including the parallel faces

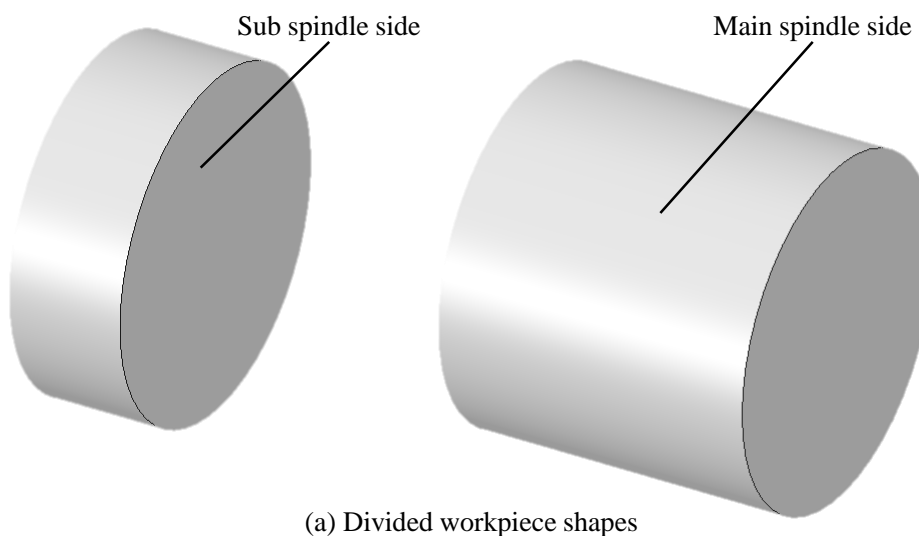
Fig. 4.4 Candidates of cutting face for dividing workpiece and target shape



(a) Rectangles having the largest max area

(b) Selected cutting face

Fig. 4.5 Selection of cutting face for dividing workpiece and target shape



(a) Divided workpiece shapes

Fig. 4.6 Division of workpiece and target shape

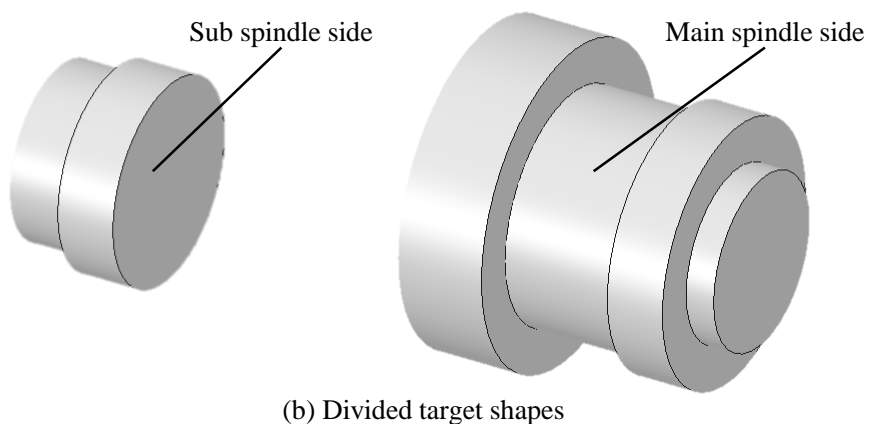


Fig. 4.6 Division of workpiece and target shape (cont.)

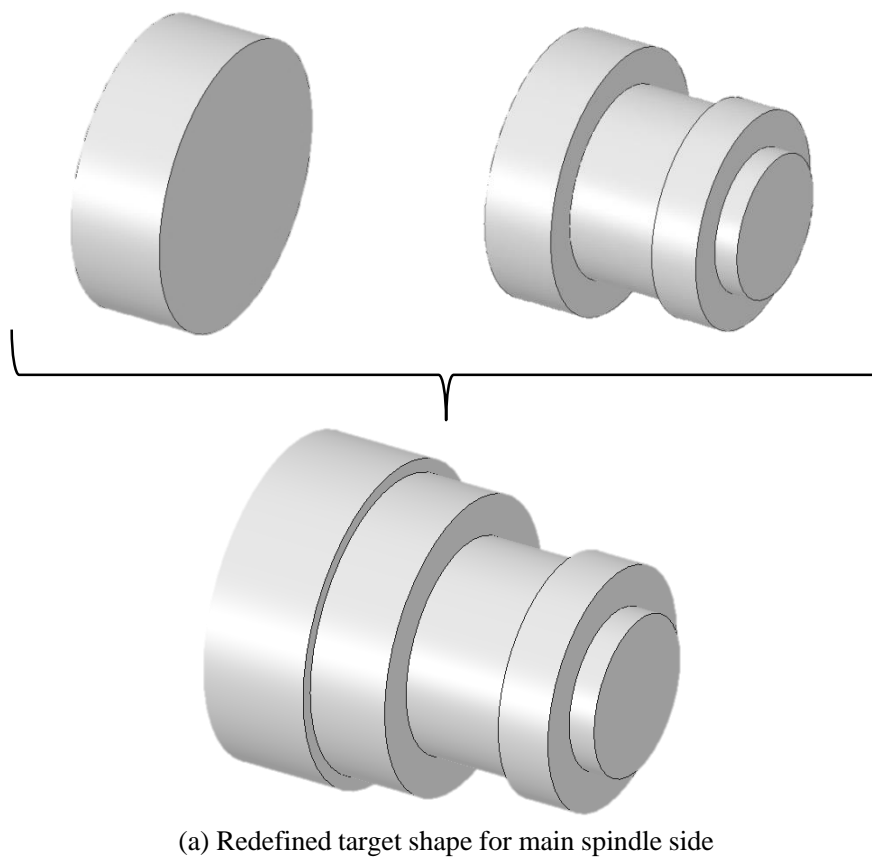
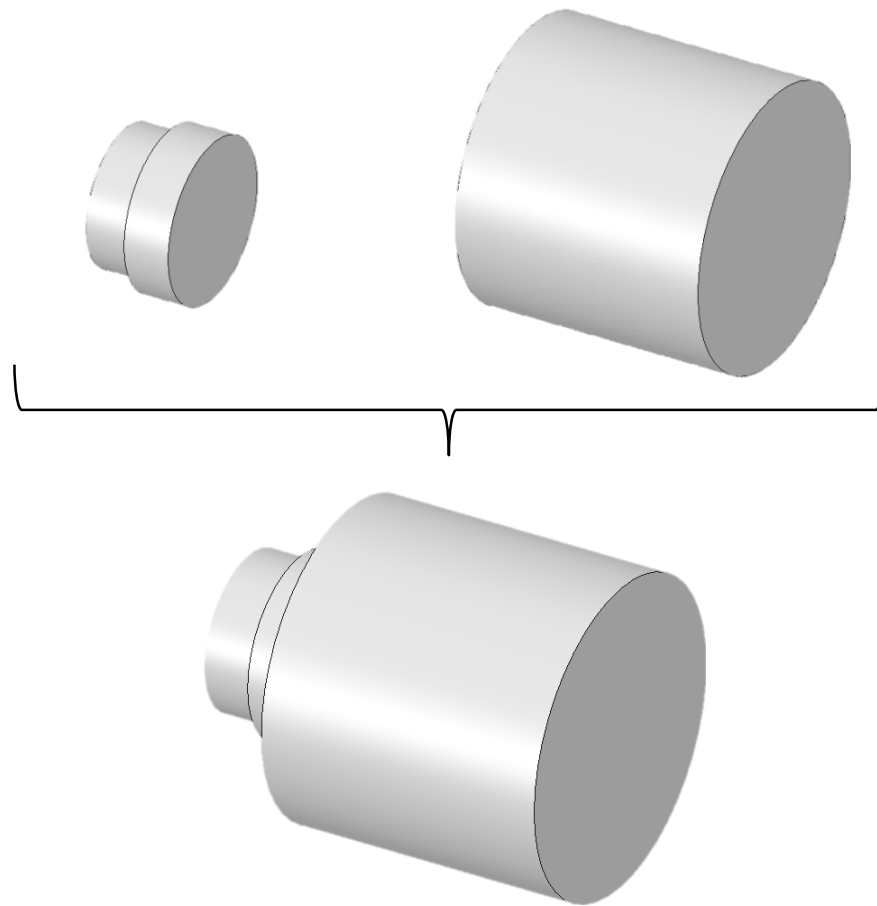


Fig. 4.7 New target shape obtained in combination with divided shapes



(b) Redefined target shape for sub spindle side

Fig. 4.7 New target shape obtained in combination with divided shapes (cont.)

4.4 同時加工を考慮した加工工程の決定

本節では、認識された加工フィーチャを基に CAM ソフトウェアへ入力する際の同時加工の取り扱いについて述べる。

ここでは認識された加工フィーチャから、加工順序が連続する2つの加工フィーチャについて考える。それらの加工フィーチャが共に旋削加工またはフライス加工のどちらか一方に割り当て可能であり、かつ旋削主軸に対して垂直方向に重複しない場合、それらは同時に加工できるものとして取り扱う。

例えば、図 4.8 のように加工順序が設定されて加工フィーチャが認識された場合、連続する加工フィーチャのうち加工順序 1 と 2、2 と 3、3 と 4 では旋削主軸の垂直方向に重複するが、加工順序 4 と 5 の加工フィーチャは重複しないため 2 つを同時に加工できる加工フィーチャとして取り扱う。

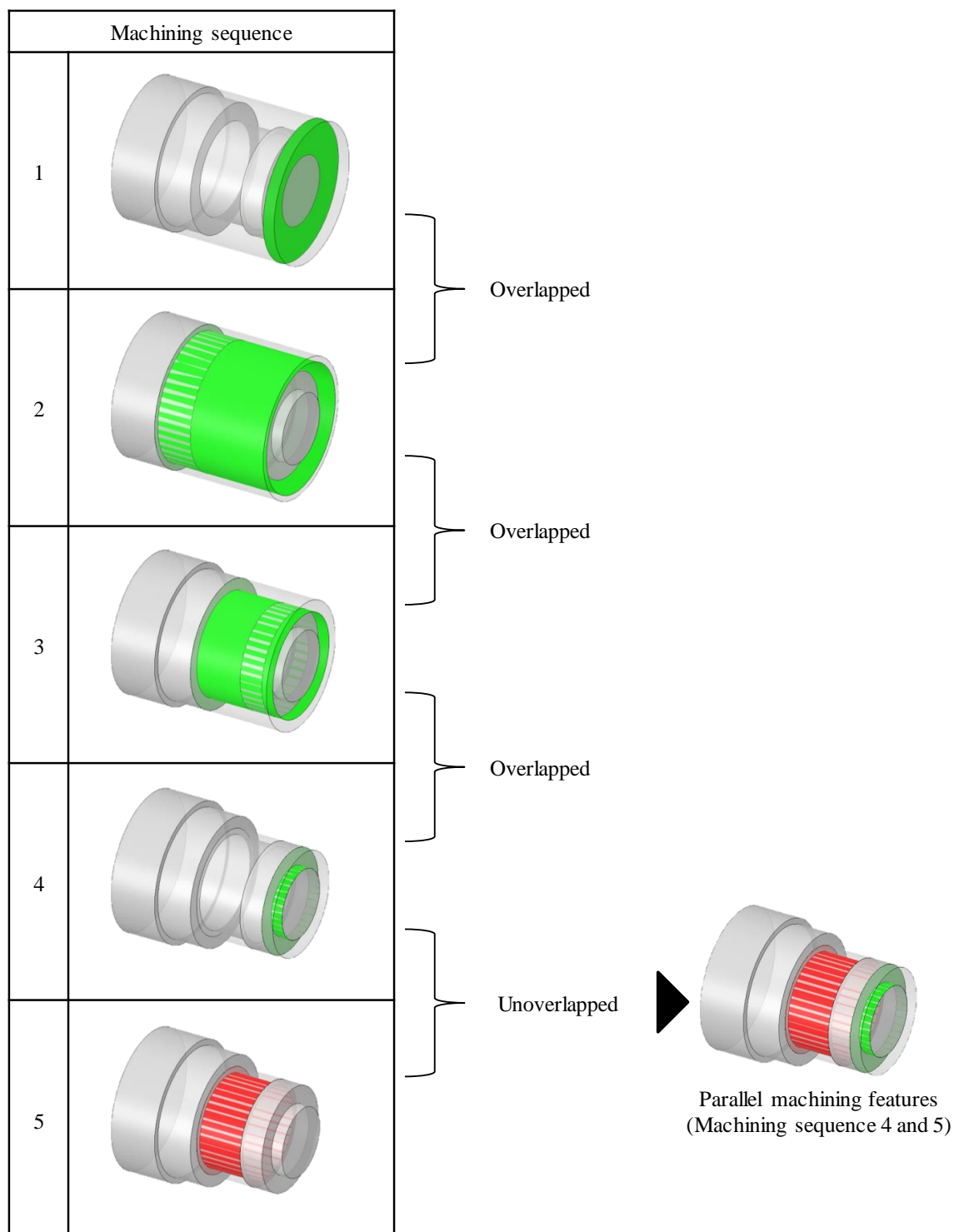


Fig. 4.8 Parallel machining features

一方で、図 4.9 のように加工順序が設定されて加工フィーチャが認識された場合、加工順序 1 と 2 の加工フィーチャは旋削主軸の垂直方向に重複するが、加工順序 2 と 3 の加工フィーチャは重複しないため 2 つを同時に加工する加工フィーチャとして取り扱う。同様に加工順序 4 と 5 の加工フィーチャも同時に加工する加工フィーチャとして取り扱う。

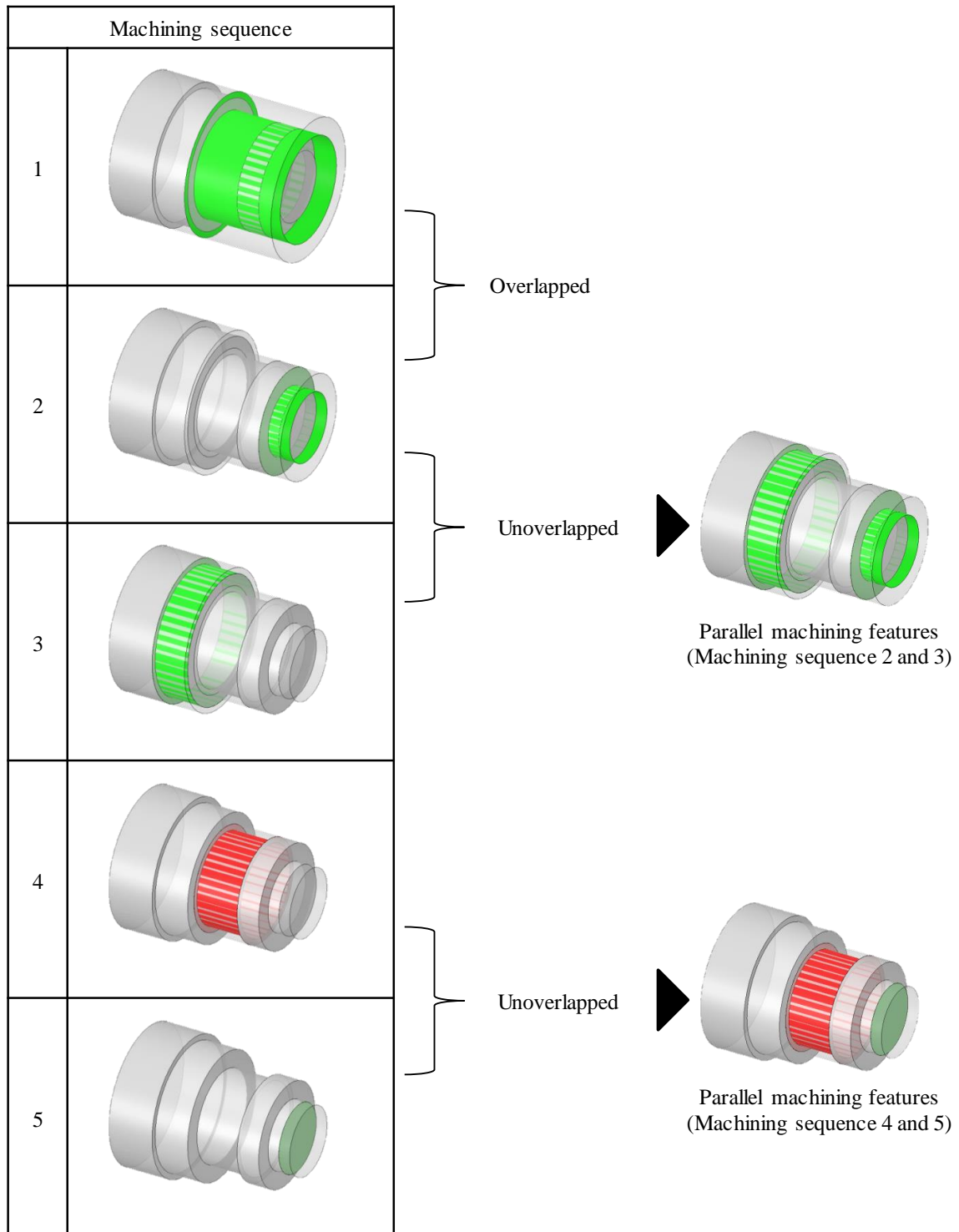


Fig. 4.9 Parallel machining features in another pattern

このように、同時加工を考慮して複数の加工フィーチャを同一の加工順序とすることが可能な場合があり、加工時間や生産リードタイムの更なる短縮が期待される。

4.5 ケーススタディ

本節では、把持替えと同時加工を可能とする提案手法で加工フィーチャを認識することでその有用性を確認した。また、認識された加工フィーチャに工程設計を施し、シミュレーションにより加工時間を予測し、把持替えと同時加工の効果についても検証した。把持替えと同時加工を考慮するため、想定した複合加工機は第1旋削主軸と対向する第2旋削主軸、および下側刃物台タレットを有するものとしている。また、工具として外形と端面旋削用バイト、溝加工用の突切りバイト、フライス加工用に3種類のスクエアエンドミル ($\phi 4, 6, 8 \text{ mm}$) を想定し、ターニングとミリングの両方で加工可能な場合はターニングを優先した。また、切削条件は想定した工具の非鉄金属の推奨条件を適用し、エンドミルは使用可能な最大径のものを用いた。想定する素材形状と目標形状を図4.10に示す。ただし、本節では把持替えと同時加工の有用性の確認のため、加工順序の設定条件は工具がアプローチしやすいものを優先し、創成面の数が少なく、創成面の総面積が大きいものから割り当てる条件とした。

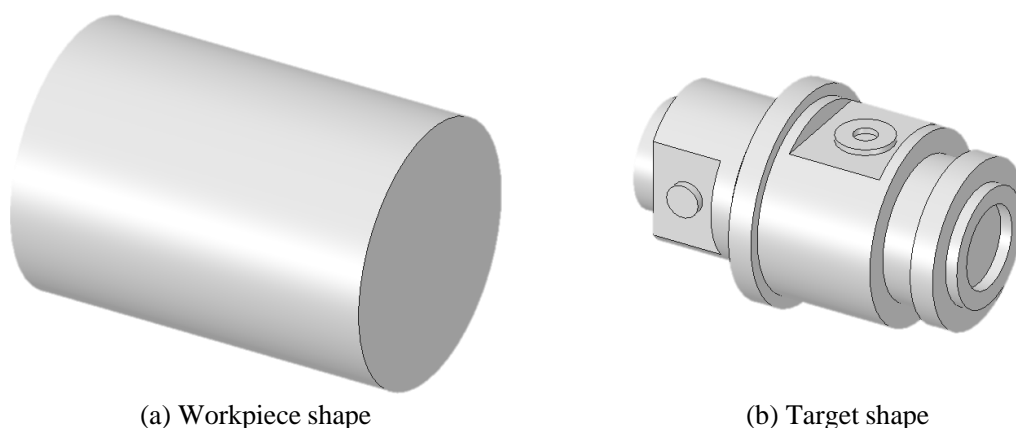


Fig. 4.10 Input information for case study

4.5.1 把持替えも同時加工も取り扱わないパターン

パターンAとして把持替えも同時加工も取り扱わない条件で加工フィーチャを認識した。認識された加工フィーチャを基に施した工程設計の結果を表4.1に示す。

Table 4.1 Process planning for Pattern A

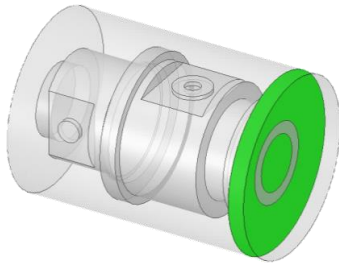
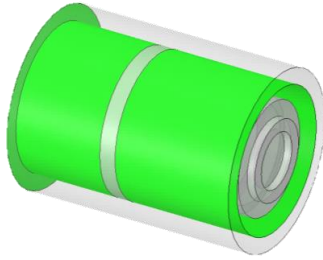
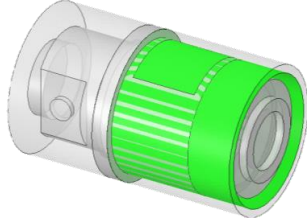
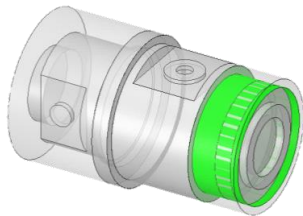
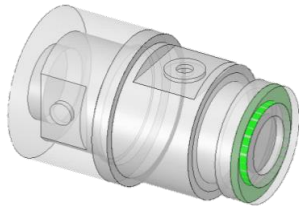
Machining sequence		Cutting conditions	
1		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) 1 9503 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
2		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 44139 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
3		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 21441 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
4		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 7775 mm ² Milling Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
5		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(B) + (a) 2 2670 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm

Table 4.1 Process planning for Pattern A (cont.)

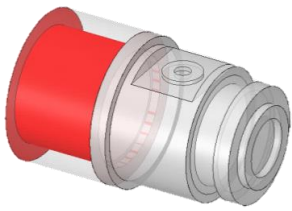
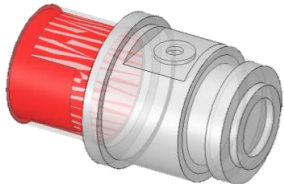
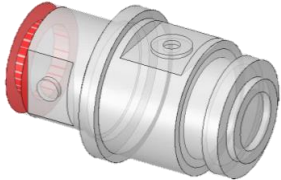
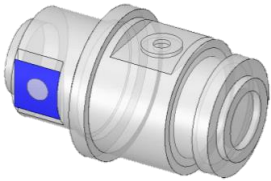
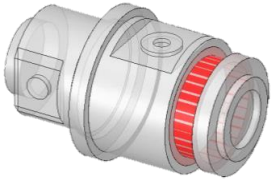
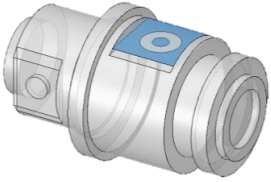
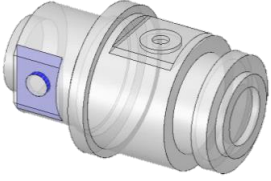
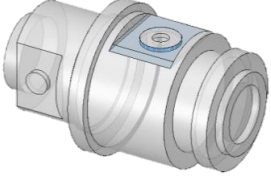
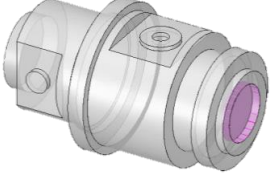
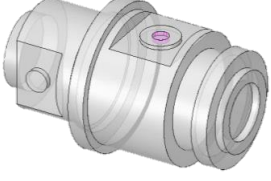
Machining sequence		Cutting conditions	
6		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(D) + (a) 3 17122 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
7		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(D) + (a) 3 11270 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
8		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(D) + (a) 3 4869 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm
9		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(K) 2 1212 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm
10		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut	(D) + (a) 2 4869 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm

Table 4.1 Process planning for Pattern A (cont.)

Machining sequence		Cutting conditions	
11		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(J) 3 1921 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm
12		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(K) + (b) 3 1375 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm
13		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(J) + (b) 4 1878 mm ² Milling End mill R3 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 3 mm
14		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(C) 5 1512 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm
15		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut	(C) 5 157 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm

4.5.2 把持替えのみ取り扱うパターン

パターンBとして把持替えのみを取り扱う条件で加工フィーチャを認識した。認識された加工フィーチャを基に施した工程設計の結果を表4.2に示す。

Table 4.2 Process planning for Pattern B

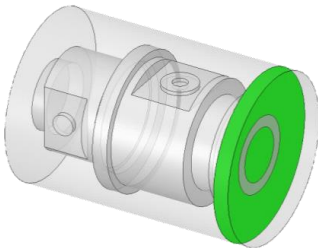
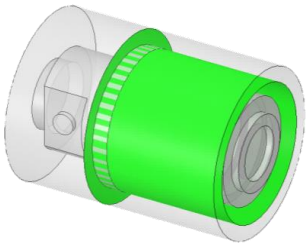
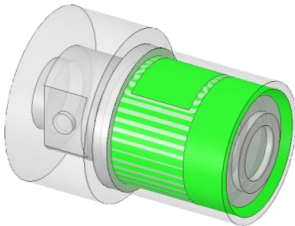
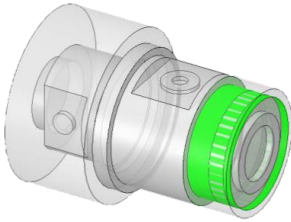
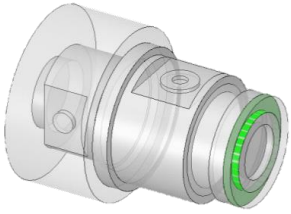
Machining sequence		Cutting conditions	
1		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) 1 9503 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
2		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 28588 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
3		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 21441 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
4		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 7775 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
5		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 2670 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main

Table 4.2 Process planning for Pattern B (cont.)

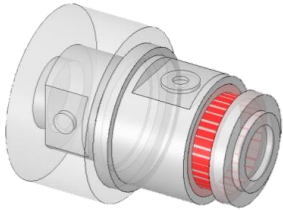
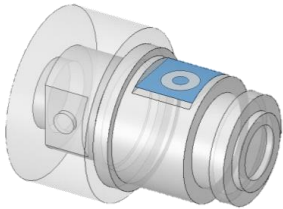
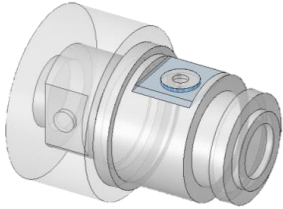
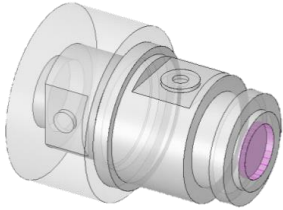
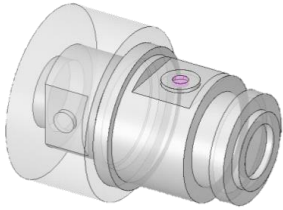
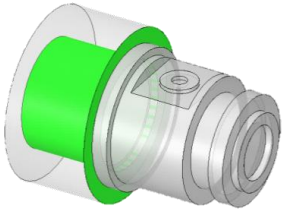
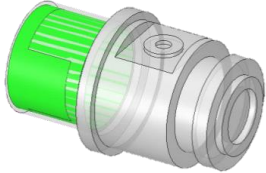
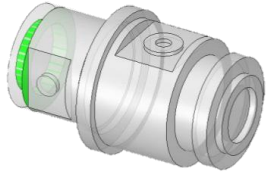
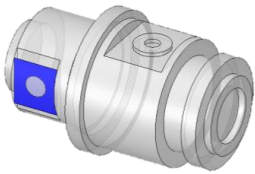
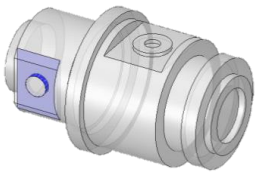
Machining sequence		Cutting conditions	
6		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(D) + (a) 3 4869 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
7		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(J) 3 1921 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Main
8		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(J) + (b) 4 1878 mm ² Milling End mill R3 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 3 mm Main
9		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(C) 5 1512 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Main
10		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(C) 5 157 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm Main

Table 4.2 Process planning for Pattern B (cont.)

Machining sequence		Cutting conditions	
11		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 17750 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
12		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 10740 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
13		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 3142 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
14		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(K) 2 1022 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Sub
15		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(K) + (b) 3 1375 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm Sub

4.5.3 把持替えと同時加工を取り扱うパターン

パターンCとして把持替えと同時加工の両方を取り扱う条件で加工フィーチャの認識を行った。認識された加工フィーチャを基に施した工程設計の結果を表4.3に示す。

Table 4.3 Process planning for Pattern C

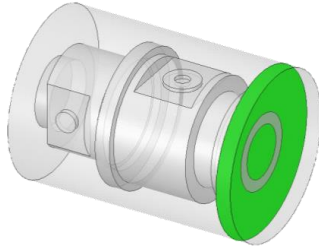
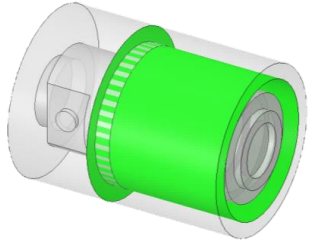
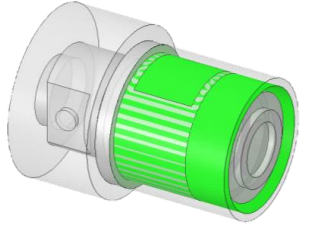
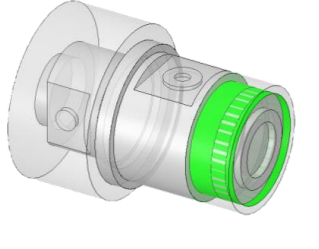
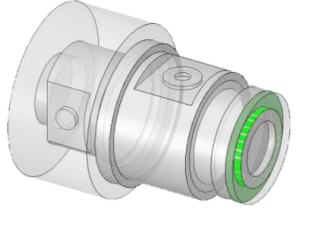
Machining sequence		Cutting conditions	
1		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) 1 9503 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
2		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 28588 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
3		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 21441 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
4		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 7775 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
5		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 2670 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main

Table 4.3 Process planning for Pattern C (cont.)

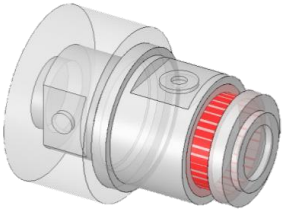
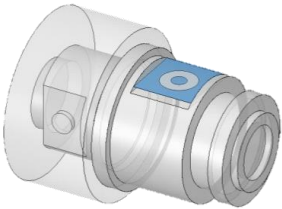
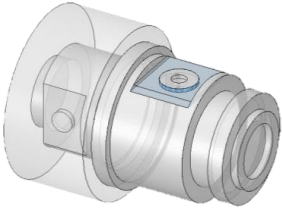
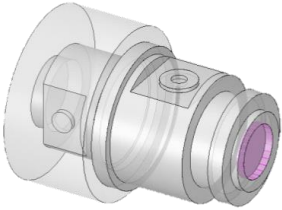
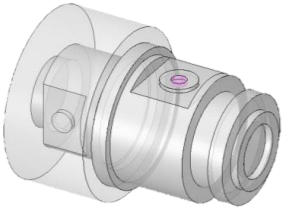
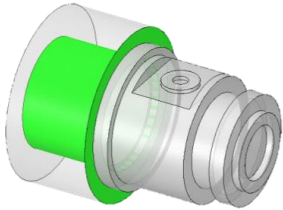
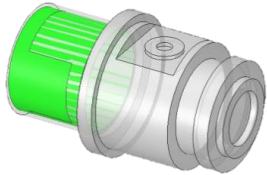
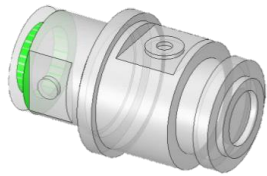
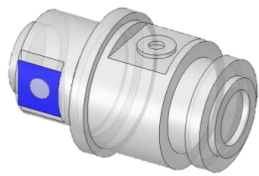
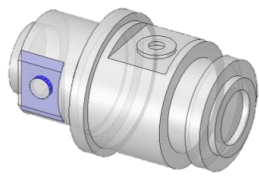
Machining sequence		Cutting conditions	
5		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(D) + (a) 3 4869 mm ² Turning Cutting-off tool 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Main
6		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(J) 3 1921 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Main
7		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(J) + (b) 4 1878 mm ² Milling End mill R3 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 3 mm Main
		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(C) 5 1512 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Main
8		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(C) 5 157 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm Main

Table 4.3 Process planning for Pattern C (cont.)

Machining sequence		Cutting conditions	
9		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 17750 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
10		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 10740 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
11		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Depth of cut Spindle	(B) + (a) 2 3142 mm ² Turning Bite 125 mm/min 2000 rpm 2 mm Sub
12		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(K) 2 1022 mm ² Milling End mill R4 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 4 mm Sub
13		Machining feature Generated surface Area Cutting method Cutting tool Feed Spindle speed Axial depth of cut Radial depth of cut Spindle	(K) + (b) 3 1375 mm ² Milling End mill R2 500 mm/min 6000 rpm 2 mm 2 mm Sub

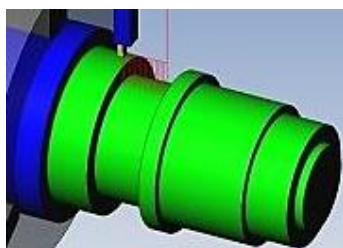
4.5.4 シミュレーションによる加工時間の予測

4.5.1 項から 4.5.3 項で示したパターン A, B, C の工程設計を基に DP Technology 製の CAM ソフトウェアである ESPRIT に入力することで工具経路を算出し、シミュレーションにより加工時間を予測した。予測された加工時間を表 4.4 に示す。

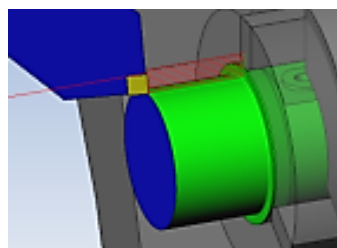
Table 4.4 Comparison of estimated machining time

	Pattern A	Pattern B	Pattern C
Time [min]	35.29	29.52	28.16

加工時間はパターン A, B, C の順で短くなっている。パターン A では表 4.1 の加工順序 6, 7, 8 のように他のパターンよりも図 4.11 に示すような溝加工に割り当てる加工フィーチャが多くなることから工具の切込み回数が増え、切削距離が長くなることで加工時間も延びていると考えられる。一方、パターン B では同図 (b) に示すように同じ領域が表 4.2 の加工順序 11, 12, 13 のように第 2 旋削主軸側で加工することで側面加工に割り当てられるため、加工時間が短縮されている。さらに、パターン C では加工フィーチャの種類はパターン B と同じだが、表 4.3 の加工順序 5, 7 のように 2 つの加工フィーチャが図 4.12 のように同時に加工されるため全体の加工工程数が減り、加工時間が最も短くなっている。



(a) Grooving in Pattern A



(b) Side turning in Pattern B

Fig. 4.11 Difference of selected cutting method

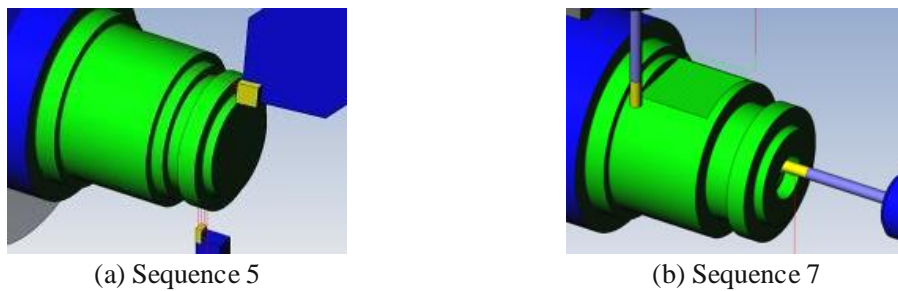


Fig. 4.12 Simultaneous machining in Pattern C

4.6 おわりに

本章では、より複雑な構造を有する複合加工機を対象に、第2旋削主軸を用いた把持替えと、下側刃物台タレットを用いた複数箇所の同時加工を可能にするための加工フィーチャ認識手法を提案した。目標形状から第1旋削主軸側と第2旋削主軸側で加工すべき領域を分割するための切断面を抽出し、素材形状と目標形状を分割して各主軸側で目標形状を再定義することで工作物の把持替えを実現するための加工フィーチャの認識を実現した。さらに、認識された加工フィーチャのうち連続する2つの加工フィーチャに着目し、それらが同一の加工方法を選択可能であり、互いに重複しない加工フィーチャであることを判断することで同時加工可能な加工フィーチャの認識を実現した。また、提案手法の有用性を確認するため、4.5節では第2旋削主軸や下側刃物台タレットを有する場合を想定し、加工フィーチャを認識するケーススタディを行った。また、シミュレーションにより加工時間を予測することで本システムの有効性と、把持替えと同時加工の効果を示した。把持替えと同時加工を考慮して加工フィーチャを認識することで加工時間は最短となり、第2旋削主軸と刃物台タレットを有する複合加工機の機能を活用したより高効率な工程設計案の導出を実現した。

第5章

設計情報を参照した工程設計

5.1 はじめに

3次元モデルを活用することで、デザインから設計、評価、生産へと至るリードタイムの更なる短縮が期待されるが、現状の生産現場では寸法公差や幾何公差、表面性状などの設計情報を含む2次元図面を併用する場合も多く、3次元モデルを十分に活用しきれていない。そこで、日本自動車工業会（JAMA）や電子情報技術産業協会（JEITA）などでは、3次元モデルに2次元製図を参考にして設計情報を含められるようにした3D単独図と呼ぶ3次元製図に関する団体規格を制定して運用している^{34)~35)}。さらに、団体規格に留まらず、3次元製図を標準化して表記方法を規定し、モデル作成者と使用者の利便性を向上させるため、デジタル技術文書情報（DTPD）に関する規格が日本産業規格（JIS）に制定されている³⁶⁾。DTPD規格の概略を図5.1に示す。DTPDでは図5.2に示すような3次元製品情報付加モデル（3DAモデル）と呼ばれる、3次元CADソフトウェアで作成した3次元モデルに幾何公差や表面性状などを直接付与できるようにしたもの³⁷⁾として、同図に示すように品質関連情報や解析関連情報などをデジタル形式で表現するものである。

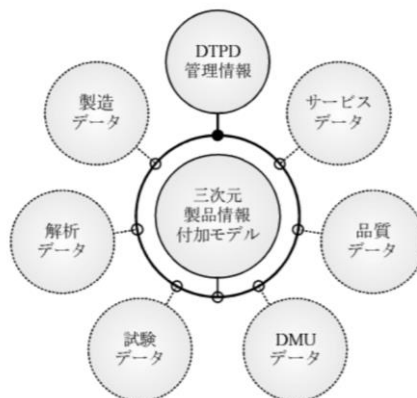
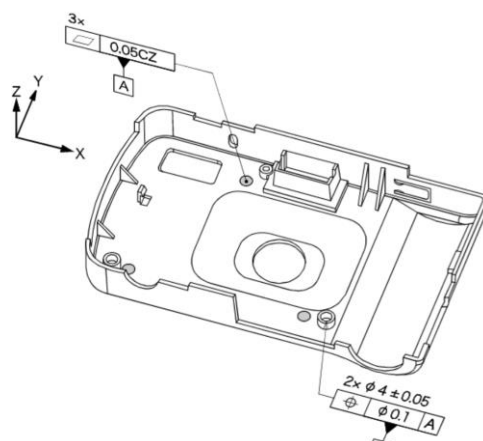


Fig. 5.1 Outline of DTPD³⁸⁾

Fig. 5.2 Example of display in 3DA model³⁸⁾

一方で、これまでの加工フィーチャの認識に関する研究では本研究を含め、3次元モデルの面や体積といった幾何学的な情報に着目して加工フィーチャを認識してきた。このため、これまでの加工フィーチャ認識手法を基に施された工程設計では、幾何公差や表面粗さなどの設計情報一切考慮されておらず、設計者の本来の意図を満たせない場合がある。そこで、近年の3次元製図の動向を参考に、目標形状に付与された幾何公差などの設計情報を参照して加工フィーチャを認識する手法を提案する。なお、本研究では従来の3次元モデルの形状や寸法等の幾何学的な情報と区別するため、非形状情報である幾何公差や表面粗さを特に設計情報と呼称する。

5.2 設計情報を参照した加工プリミティブの取得

本研究では、目標形状として幾何公差などの設計情報が付与された製品形状を利用するが、除去領域を取得し、境界面を拡張して加工プリミティブを取得する処理はこれまでと同様であり、様々な加工プリミティブの組合せが取得される。例えば、図 5.3 に示す素材形状と設計情報を持つ目標形状を入力情報とすると、図 5.4 (a) のように2つ加工プリミティブ A, B が取得される。ここで、目標形状の赤色に着色した面に設計情報が付与されていた場合、この面が含まれる領域を異なる加工プリミティブとして分割して取得すると、加工工程ごとの加工誤差の差異によって設計情報を満たすことが困難な場合がある。そこで、本研究では、目標形状の設計情報が付与された面を共有する加工プリミティブを、同図 (b) のように加工プリミティブ A+B として結合する。さらに、設計情報が付与された目標形状の面に接する創成面へと設計情報を引き継ぐことで、同一工程で加工される加工プリミティブとして取り扱う。これにより、同じ設計情報を含

む場合に、加工工程の差異を無くして設計情報を満足するための加工プリミティブが取得できる。

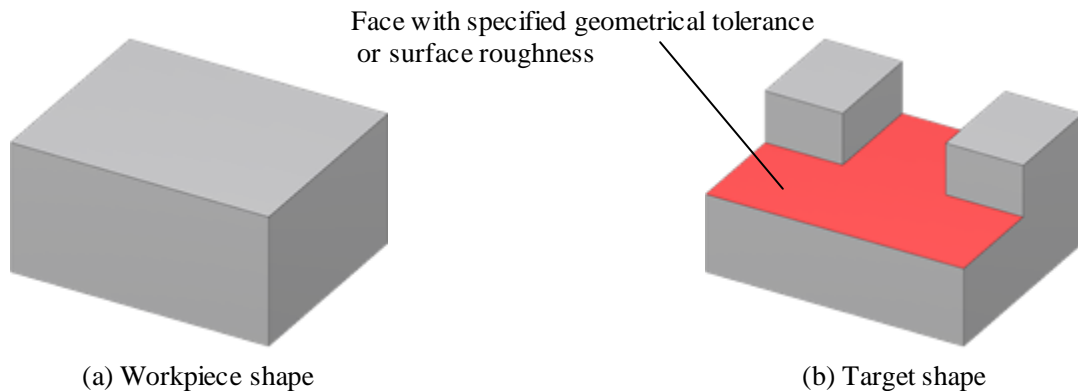


Fig. 5.3 Input information

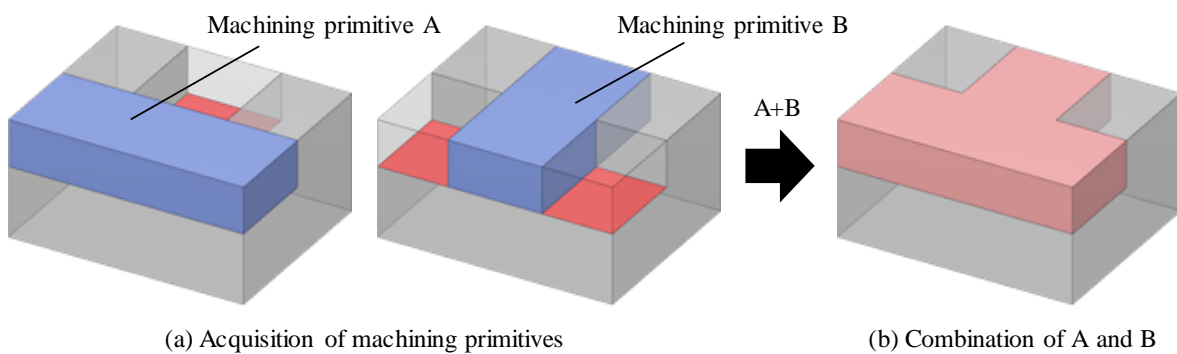


Fig. 5.4 Combination of machining features with same design information

5.3 設計情報を参照した加工順序の設定

これまでの加工フィーチャ認識手法では、取得した加工プリミティブに対して、創成面の面積や加工プリミティブの体積など、その形状から得られる幾何学的な情報に基づいて加工順序を割り当てていた。そのため、複数の加工プリミティブに同じ設計情報が与えられていても、それらの形状から得られる幾何学的な情報から各々に異なる加工順序が割り当てられ、加工工程の差異により設計情報を満足しない場合がある。そこで、同じ設計情報を継承した創成面を有する加工プリミティブに対して同一の加工順序を割り当てることで、複数の加工プリミティブを1個の加工プリミティブとして取り扱うことで加工工程を集約する。

また、設計情報として参照する幾何公差は平面度や円筒度などの形体そのものに付与

できる単独形体と、平行度や同軸度などデータムとの関係を規定する関連形体に分けられる。特に関連形体を含む加工プリミティブにおいて、基準となるデータムとの関係を明確にするため、加工順序を設定する際にも設計情報を参照する。ここでは、関連形体を含む加工プリミティブは参照すべきデータムを含む加工プリミティブよりも後続となるように加工順序を割り当てるようにする。

例えば、図 5.5 の素材形状と目標形状からは図 5.6 のように 3 個の加工プリミティブ C, D, E が取得される。ここで、目標形状の赤色で示した面は青色の面をデータムとする平行度、緑色の 2 つ面は共通公差域を持つ円筒度を示している。これらの加工プリミティブに対して、幾何学的な情報である加工プリミティブの体積が大きいものから加工順序を割り当てた場合、最初に加工プリミティブ C へ加工順序が割り当てられる。しかし、加工プリミティブ C は関連形体である平行度を含む加工プリミティブであり、参照すべきデータムを含む加工プリミティブ D へ先行して加工順序を割り当てる。このとき、図 5.7 に示すように残りの加工プリミティブは加工プリミティブ D との共有部分が除去され、加工プリミティブ C は C₁ と C₂ に分割され、加工プリミティブ E は E₁ と E₂ に分割される。これら分割された加工プリミティブに対して体積の大きいものに優先して加工順序を割り当てると図 5.8 のように C₁, E₁, C₂, E₂ の順となり、同一の設計情報を含む加工プリミティブであっても加工工程が分割されてしまう。そのため、図 5.9 に示すように同じ設計情報を含んでいた加工プリミティブ C₁ と C₂ を C₁₊₂, 同様に E₁ と E₂ を E₁₊₂ として分割された加工プリミティブを各々 1 個の加工プリミティブとして取り扱い、ここでは結果として体積の合計が大きい順に C₁₊₂, E₁₊₂ となるように加工順序が割り当てる。

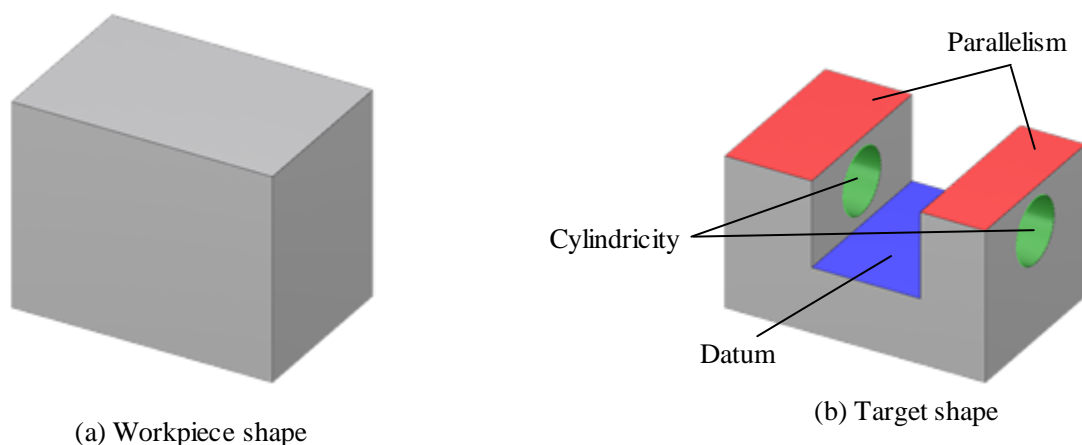


Fig. 5.5 Input information

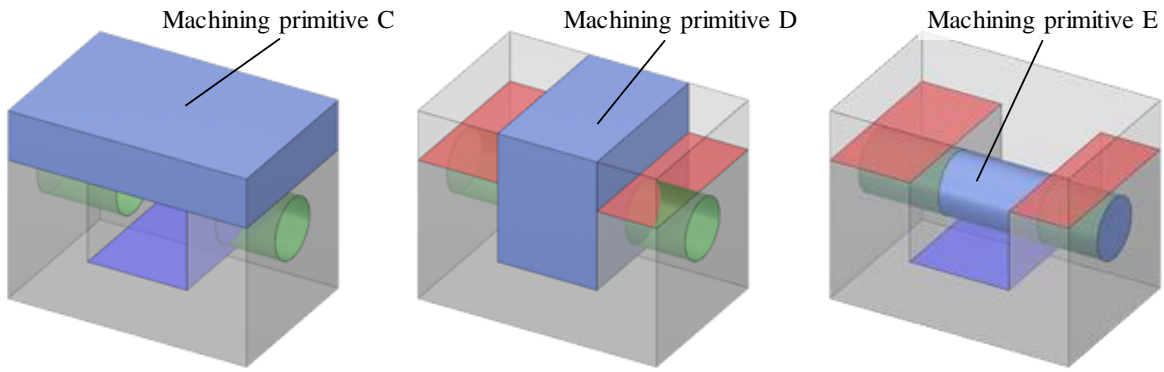


Fig. 5.6 Acquired machining primitives (C, D, E)

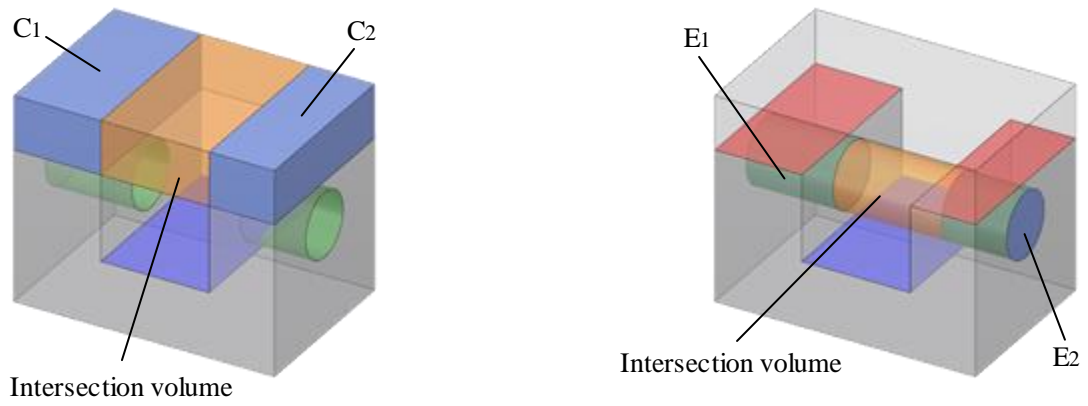


Fig. 5.7 Division of machining primitives

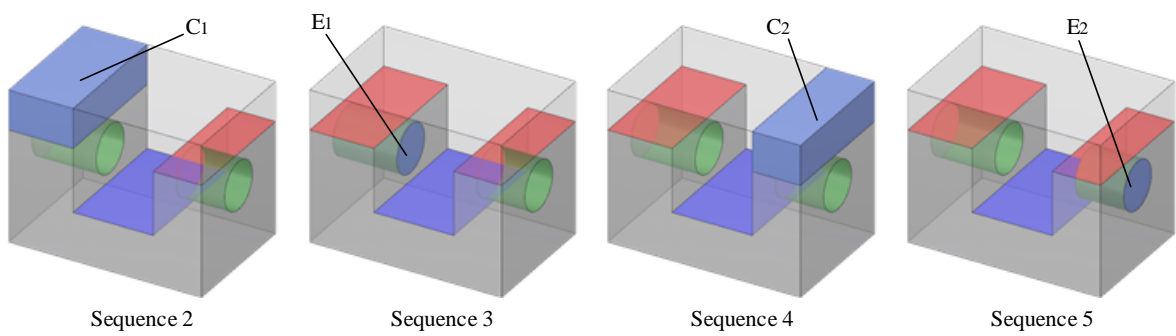


Fig. 5.8 Allocation of machining sequence based on divided machining primitives

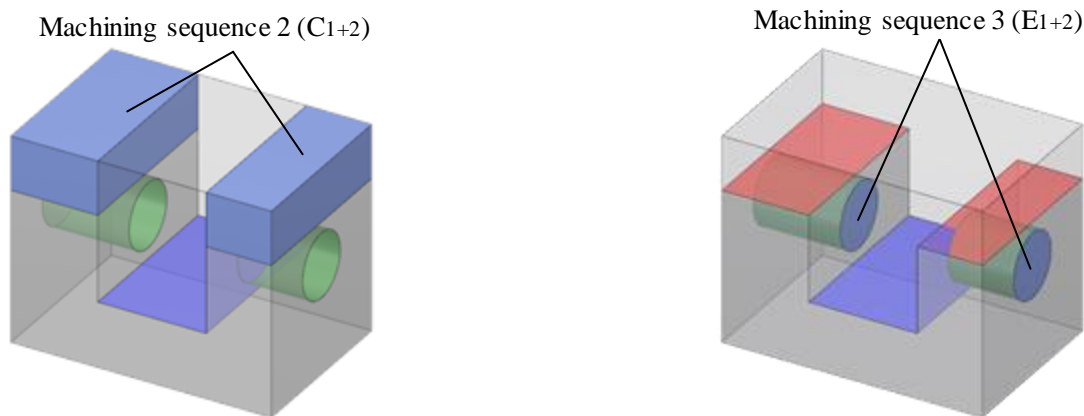


Fig. 5.9 Allocation of machining sequence considering same design information

5.4 複数の加工プリミティブで構成される加工フィーチャの認識

取得した加工プリミティブの形状，創成面の数や組合せに基づいて加工フィーチャは認識される．しかし，これまでは1つの加工工程に1個の加工プリミティブしか存在しないことを想定して，各加工プリミティブの形状や創成面の情報から加工フィーチャを認識していた．一方，本研究では同じ設計情報が付与された複数の加工プリミティブが存在する場合には，加工工程を同一にするため，複数の加工プリミティブを包括した1つの加工フィーチャとして認識する．このため，同一平面上や同一円筒面上に存在する創成面を1つの創成面とする．これにより，複数の加工プリミティブを包括した形状においても，創成面の数や組合せを基に加工フィーチャを認識することが可能となる．

例えば，図 5.10 に示す 2 個の加工プリミティブにおいて，複数の加工プリミティブから構成される加工フィーチャを想定していない従来の手法では，加工プリミティブの形状と創成面の情報から図 5.11 (a) のようにそれぞれ直方体状の加工フィーチャである (K) Step, (F) Face P と異なる種類の加工フィーチャとして認識される．一方，これらの加工プリミティブに同じ設計情報が付与されていた場合，同図 (b) のように 2 個の加工プリミティブの創成面のうち同一平面上に存在する創成面は 1 つの創成面とみなし，さらに 2 個の加工プリミティブは共に直方体であるため，直方体状の加工フィーチャである (K) Step として 2 個の加工プリミティブを包括した場合であっても加工フィーチャとして認識される．

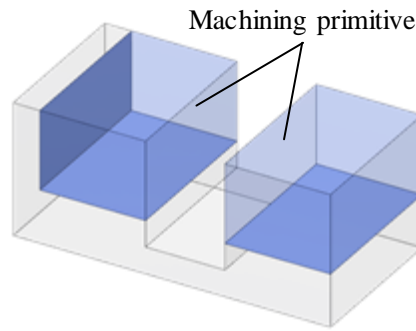
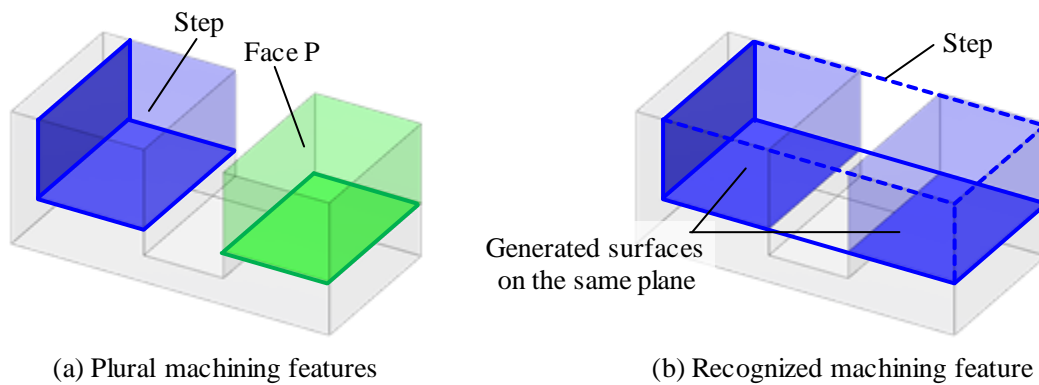


Fig. 5.10 Machining primitives having same design information



(a) Plural machining features

(b) Recognized machining feature

Fig. 5.11 Recognition of machining feature for plural machining primitives allocated the same machining sequence

5.5 ケーススタディ

設計情報を参照して加工フィーチャを認識する提案手法の有用性を確認するためにケーススタディを行った。図 5.12 に示す素材形状と目標形状を入力情報として、目標形状の着色した面には同図 (c) の幾何公差や表面粗さなどの設計情報が付与されていることを想定した。ここで、同じ色で着色された面は、平面度や円筒度などのように形体そのものに付与できる単独形体の幾何公差では共通公差域を有していることを示し、その他の場合は同一の設計情報が付与されていることを表している。

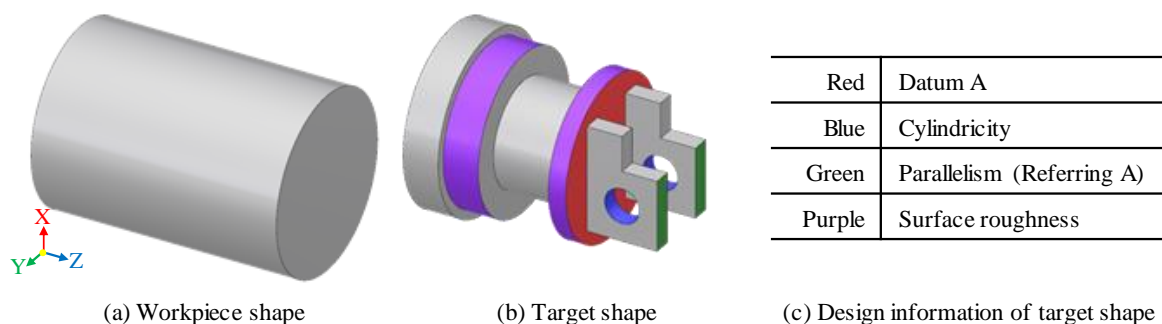


Fig. 5.12 Input information for case study

このケーススタディでは、これまでの加工フィーチャ認識の例として、幾何学的な情報である体積の大きい加工プリミティブから加工順序を割り当てて加工フィーチャを認識したパターンを A とした。また、幾何学的な情報に加え、設計情報を参照して加工プリミティブを結合して加工フィーチャを認識したパターンを B、さらに加工順序を決定する際にも設計情報を参照して加工フィーチャを認識したパターンを C とした。

入力された素材形状と目標形状の差分として得られる除去領域から加工プリミティブを取得した結果、パターン A では表 5.1 に示すように 10 個の加工プリミティブが取得されている。一方、パターン B と C では表 5.2 に示すように 6 個の加工プリミティブが取得されている。これらのパターンでは設計情報を参照して、設計情報が付与された目標形状の面を共有する加工プリミティブが結合され、パターン A では表 1 の加工プリミティブ 4 から 8 として取得されていた 5 個の加工プリミティブが 1 個に結合されている。

Table 5.1 Acquired machining primitive in Pattern A

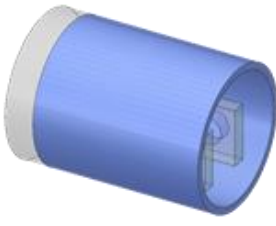
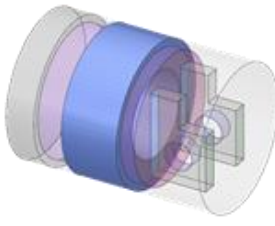
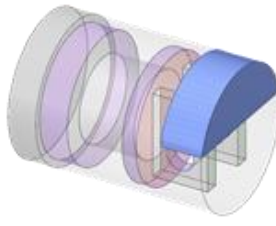
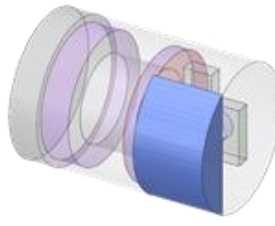
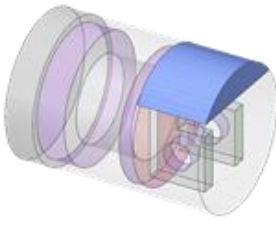
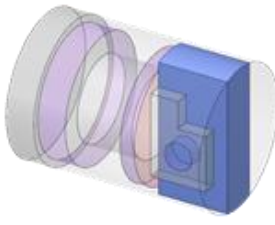
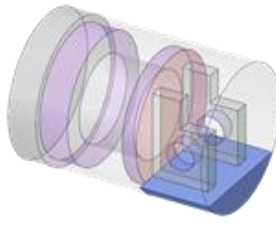
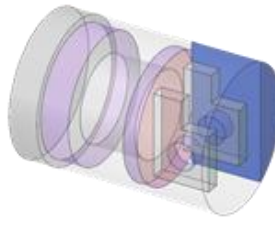
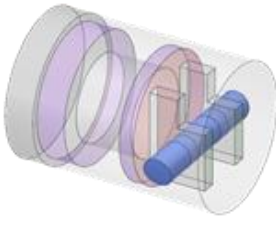
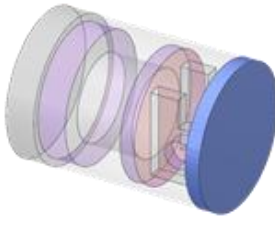
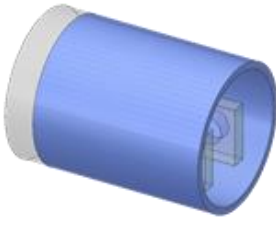
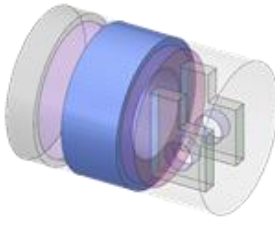
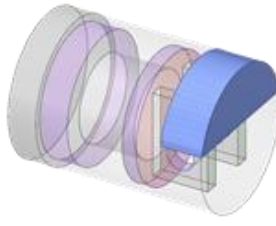
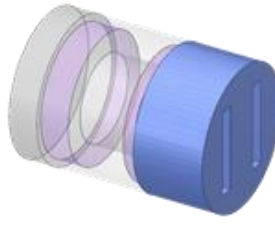
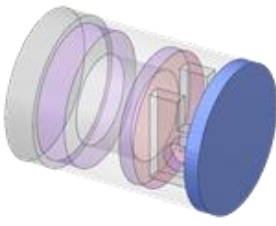
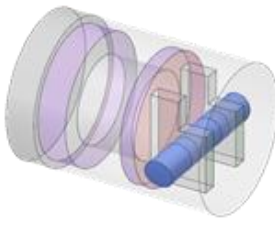
1	2	3	4
			
5	6	7	8
			
9	10		
			

Table 5.2 Acquired machining primitives in Patterns B and C

1	2	3	4
			
5	6		
			

パターンAで認識された加工フィーチャとそれらの加工順序を表5.3にまとめて示す。パターンAでは表5.1の加工プリミティブから、体積の大きい順に加工順序を割り当てながら加工プリミティブの共有部分を除去して、加工フィーチャの種類を繰り返すことで、最終的に16個の加工プリミティブと6種類の加工フィーチャが認識されている。加工順序2から4の加工プリミティブは同じ設計情報を持つ目標形状の面と同一の平面上にあるが、加工プリミティブが結合されておらず、異なる加工工程となっている。また、加工順序5、6の加工プリミティブも同じ設計情報を持つ目標形状の面と同一の円筒面上にあるが、設計情報を参照せずに幾何学的な情報である体積の大きさに基づいて加工順序を割り当てた結果、分割された異なる加工工程となっている。

Table 5.3 Recognized machining features in Pattern A

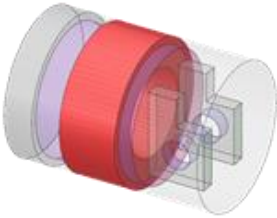
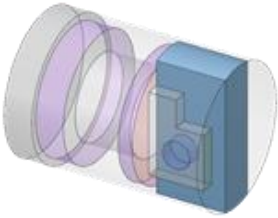
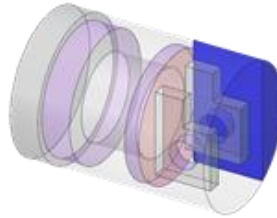
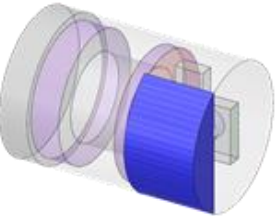
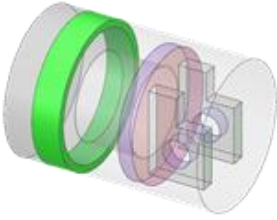
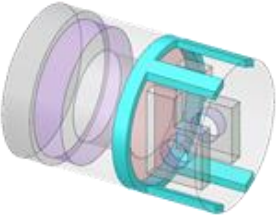
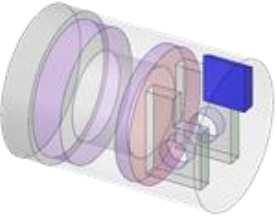
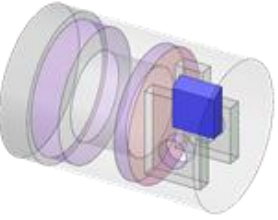
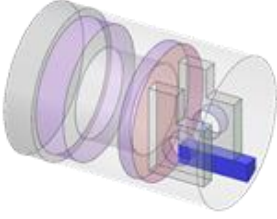
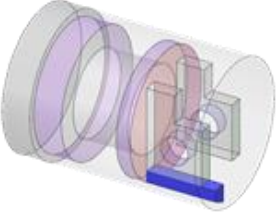
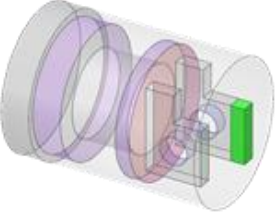
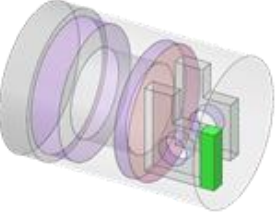
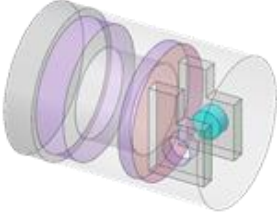
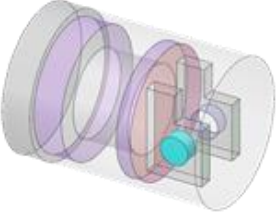
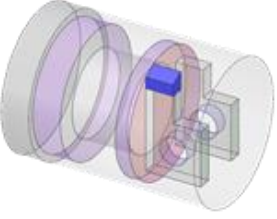
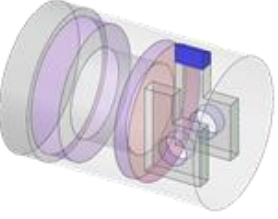
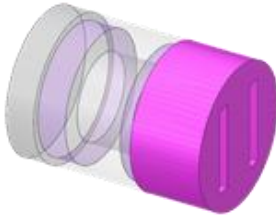
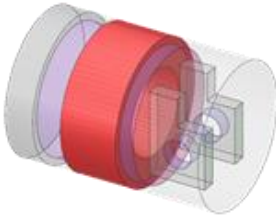
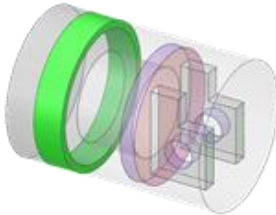
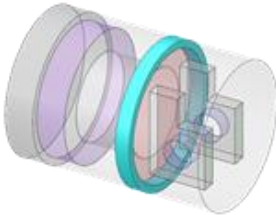
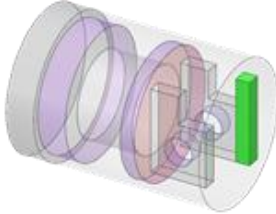
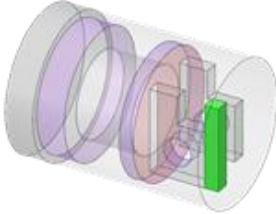
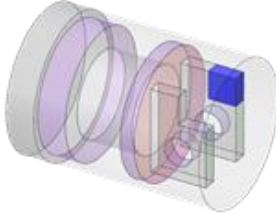
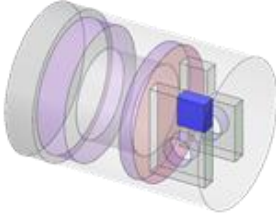
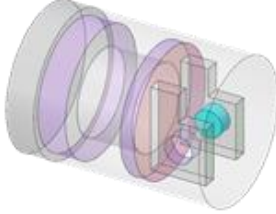
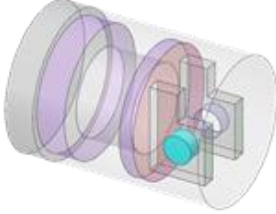
Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4
 (D) Split face C + Boss C	 (J) Open slot	 (K) Step	 (K) Step
Sequence 5	Sequence 6	Sequence 7	Sequence 8
 (B) Face C + Boss C	 (A) Through hole	 (K) Step	 (K) Step
Sequence 9	Sequence 10	Sequence 11	Sequence 12
 (K) Step	 (K) Step	 (F) Face P	 (F) Face P
Sequence 13	Sequence 14	Sequence 15	Sequence 16
 (A) Through hole	 (A) Through hole	 (K) Step	 (K) Step

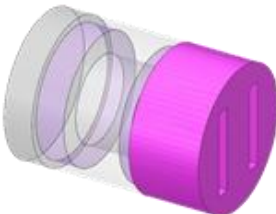
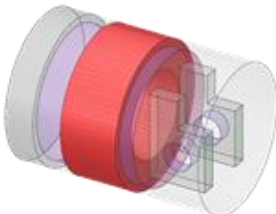
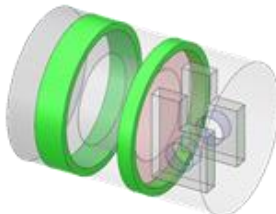
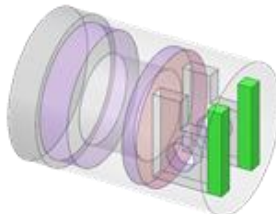
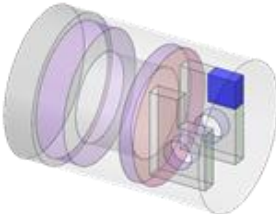
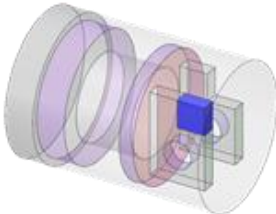
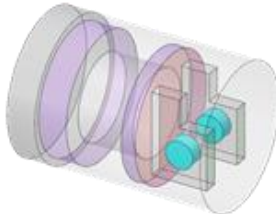
表 5.4 にパターン B で認識された加工フィーチャと加工順序をまとめて示す。ここでは、表 5.2 の加工プリミティブから体積の大きい順に加工順序を割り当て、最終的に 10 個の加工プリミティブと 6 種類の加工フィーチャが認識されている。表 5.3 に示すようにパターン A では加工順序 2, 3, 4 のように分割され異なる加工順序が割り当てられていた加工プリミティブが、表 5.4 に示すようにパターン B では設計情報を参照して加工プリミティブ取得時に結合され、同一工程なるように加工順序 1 の加工フィーチャとして認識されている。一方、加工順序の設定では設計情報を参照しておらず、加工順序 3, 4 や加工順序 5, 6 の加工プリミティブなどは同一の設計情報を持っているが異なる加工工程となっている。

Table 5.4 Recognized machining features in Pattern B

Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4
 (G) Closed pocket	 (D) Split face C + Boss C	 (B) Face C + Boss C	 (A) Through hole
Sequence 5	Sequence 6	Sequence 7	Sequence 8
 (F) Face P	 (F) Face P	 (K) Step	 (K) Step
Sequence 9	Sequence 10		
 (A) Through hole	 (A) Through hole		

同様に、パターンCで認識された加工フィーチャと加工順序をまとめて表5.5に示す。パターンCでは7個の加工プリミティブと6種類の加工フィーチャが認識されている。加工順序1の加工プリミティブはパターンBと同様に設計情報を参照して結合して取得された加工プリミティブが同一工程となるように加工順序が割り当てられている。また、パターンBでは表5.4の加工順序3,4の加工工程に分割されていた2個の加工プリミティブが、パターンCでは加工順序3の加工工程に集約されている。さらに、集約された2個の加工プリミティブの形状が円柱状であるため、同一円筒面上の創成面を1つの創成面として取り扱うことで、円柱状の加工フィーチャである(B) Face C + Boss Cとして認識されている。同様に、パターンBで加工順序9,10の加工工程となる2個の加工プリミティブはパターンCでは加工順序7に集約され、同一円筒面上の創成面を1つの創成面として取り扱うことで円柱状の加工フィーチャである(A) Through holeとして認識されている。一方、パターンBでは加工順序5,6の加工工程となる2個の加工プリミティブはここでは加工順序4の加工工程に集約され、その形状が直方体状であり同一平面状の創成面を1つの創成面として取り扱うことで、直方体状の加工フィーチャである(F) Face Pとして認識されている。

Table 5.5 Recognized machining features in Pattern C

Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4
 (G) Closed pocket	 (D) Split face C + Boss C	 (B) Face C + Boss C	 (F) Face P
Sequence 5	Sequence 6	Sequence 7	
 (K) Step	 (K) Step	 (A) Through hole	

以上の結果から、提案手法によって加工プリミティブの体積などの幾何学的な情報のみに基づく場合とは異なる加工プリミティブが取得され、同じ設計情報が付与された加工プリミティブを1つの加工プリミティブとして取り扱うことで、幾何公差や表面粗さなどの設計情報を参照して加工フィーチャの認識が可能であることを確認した。

ここでさらに、パターン D として図 5.12 (b) の目標形状において、付与された設計情報を変更した目標形状を図 5.13 に示す。着色した面には同図 (b) で示した設計情報が付与され、同じ色で着色された面は、同じ設計情報であることを示している。また、加工順序はパターン C と同様に設計情報を参照しながら、幾何学的な情報として加工プリミティブの体積が大きいものに優先して割り当てた。

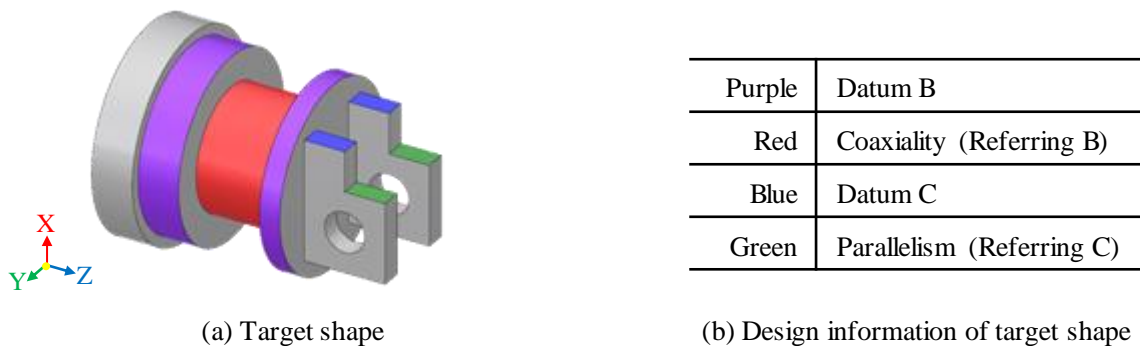
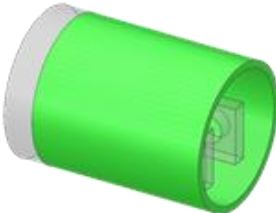
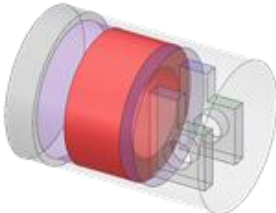
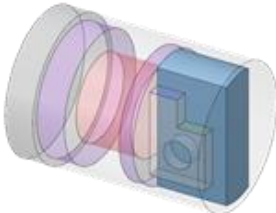
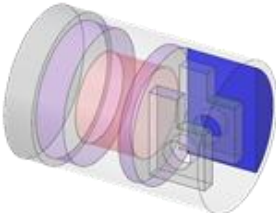
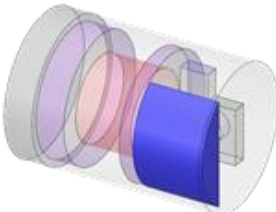
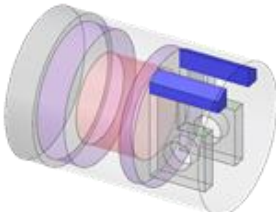
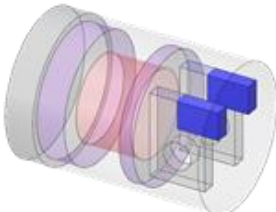
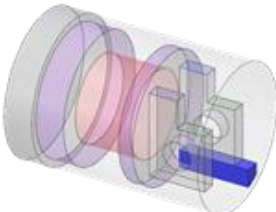
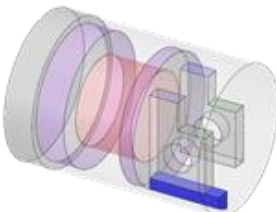
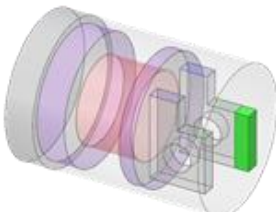
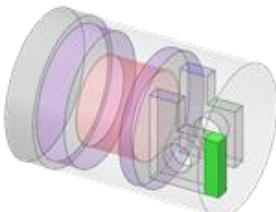
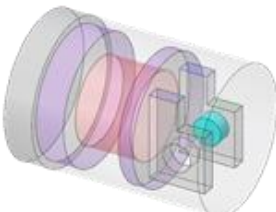
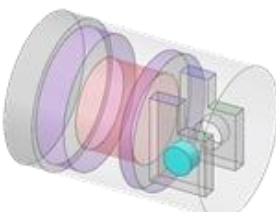


Fig. 5.13 Input information for Pattern D changed design information

表 5.6 にパターン D で認識された加工フィーチャと加工順序をまとめて示す。ここでは、13 個の加工プリミティブと 6 種類の加工フィーチャが認識されている。設計情報を変更したことで、他の条件が共通するパターン C とは異なる加工順序が割り当てられて加工フィーチャが認識されていることが確認できる。例えば、表 5.6 の加工順序 3 から 5 の加工プリミティブなどは、パターン C では設計情報を持つ目標形状の同一平面上に存在することから 1 つの加工プリミティブに結合されて加工フィーチャが認識されていた。一方、パターン D ではそれらの加工プリミティブが設計情報を含まないため、結合されることなく別々の加工プリミティブとして取り扱われて、それぞれ加工フィーチャが認識され、異なる加工工程となっている。ここで、加工順序 1 の加工プリミティブと加工順序 2 の加工プリミティブに着目すると、加工プリミティブの体積は加工順序 2 の加工プリミティブの方が大きい、関連形体である同軸度を含んでいる。参照すべきデータは加工順序 1 の加工プリミティブに含まれているため、ここでは加工順序 2 の加工プリミティブに先行して最初の加工順序が割り当てられている。また、加工順序 6 の

加工工程では2個の加工プリミティブが同じ設計情報を持つため、1つの加工工程に集約されており、同一平面上の創成面を1つの創成面として取り扱うことで直方体状の加工フィーチャである (K) Step として認識されている。同様に、加工順序7においても2個の加工プリミティブが1つの加工工程に集約されて、直方体状の加工フィーチャ (K) Step として認識されている。さらに、加工順序1, 2の場合と同様に、加工順序6の加工プリミティブはデータムを含み、それを参照する関連形体の平行度の設計情報を持つ加工順序7の加工プリミティブに先行して加工順序が割り当てられている。

Table 5.6 Recognized machining features in Pattern D

Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4
 (B) Face C + Boss C	 (D) Split face C + Boss C	 (J) Open slot	 (K) Step
Sequence 5	Sequence 6	Sequence 7	Sequence 8
 (K) Step	 (K) Step	 (K) Step	 (K) Step
Sequence 9	Sequence 10	Sequence 11	Sequence 12
 (K) Step	 (F) Face P	 (F) Face P	 (A) Through hole
Sequence 13			
 (A) Through hole			

パターンCとパターンDの結果から、目標形状が同じであっても付与された設計情報に応じて加工プリミティブを取得し、加工順序を割り当てながら設計情報を参照して加工フィーチャを認識することで、異なる工程設計を実施できることを確認した。

5.6 おわりに

本章では、近年の3次元製図の動向を参考に、従来は考慮されていない幾何公差や表面粗さなどの設計情報が目標形状に付与されている場合に、それらを参照して設計者の意図を満たすための工程設計の実現に向けた加工フィーチャ認識手法について述べた。設計情報を持つ目標形状の面を共有する加工プリミティブを結合して1個の加工プリミティブとすることに加え、加工順序を設定する際に同じ設計情報を持つ複数の加工プリミティブに同一の加工順序を割り当てて加工工程を集約し、同一平面上や同一円筒面上の創成面を1つの創成面として取り扱うことで加工フィーチャとして認識することを可能とした。目標形状に設計情報が付与されたケーススタディの結果から、加工工程の差異が生じないように幾何学的な情報だけでなく設計情報を参照して加工フィーチャを認識する提案手法の有用性を示した。

第6章

結 論

本研究では上野らが提案した加工フィーチャを基に、従来は想定されていなかった面取り箇所や自由曲面などの特定形状部が含まれるような複雑で実用的な目標形状に対して加工フィーチャを認識する手法を提案した。さらに、多軸・複合加工機用の工程設計支援システムの開発に向け、3軸制御のマシニングセンタだけでなく、5軸制御のマシニングセンタや複合加工機で加工される形状へと適応範囲を拡大した。

加えて、更なる効率化を目指して第1旋削主軸に加えて第2旋削主軸や、下側刃物台タレットを備えた複合加工機が登場しており、それらの機能を有効に活用するために、工作物を旋削主軸間で把持替えして全方向から加工するための加工フィーチャの認識手法や、下側刃物台タレットを用いて複数の箇所を同時に加工するための加工順序の設定と加工フィーチャの取り扱いも考慮できる手法を提案した。

また、近年の3次元製図の規格化に関する動向を参考に、面積や体積といった3次元モデルの幾何学的な情報のみならず、3次元モデルに付与された幾何公差や表面粗さなどの設計情報を参照して加工プリミティブを取得した加工プリミティブから加工フィーチャを認識する手法を提案した。

本研究で得られた結果および考察より、次のような知見を得た。

i. システムの自動化

従来のCAMシステムは工程設計を作業者が行うため、作業者に高い技能と時間的負担を強いていた。本研究で開発した工程設計支援システムでは、3次元CADソフトウェア上で定義された素材形状と目標形状から、加工工程を特徴付ける加工フィーチャを自動的に認識することで工程設計に掛かる作業者の技術的・時間的負担を削減することに寄与できる。また、加工方法や工具などを一意に決定しないため、作業者の意向を取り入れた工程設計を可能にしている。

ii. 複雑な部品形状への対応

第2章では、複雑で実用的な部品形状を想定し、面取り箇所や自由曲面などの特徴形状部が含まれる目標形状を、それらを取り除くように近似することで加工フィーチャを認識した。また、無数に存在する複雑な加工プリミティブの形状ごとに加工フィーチャを定義した場合、必要な加工フィーチャの種類が膨大となり現実的ではない。そこで、円錐やテーパを含む形状などは円柱へと変換し、それ以外の形状は直方体へと変換することで、円柱と直方体の単純な加工フィーチャとして認識することが可能となった。3軸制御のマシニングセンタを想定したケーススタディの結果、複雑な部品形状を対象として加工フィーチャを認識する提案手法の有用性を示した。

また第3章では複雑形状から加工フィーチャを認識する手法の適応範囲を多軸・複合加工機へと拡大し、把持面以外の全方向から加工するための加工フィーチャを認識した。5軸制御のマシニングセンタを想定したケーススタディでは、加工フィーチャの方向を判断した割出し加工により、複雑形状を含む除去領域から加工フィーチャを認識した。また、複合加工機を想定したケーススタディでは、加工順序設定時にいくつかのパターンにより円筒形状を含む目標形状から加工フィーチャを認識することで、作業者の意向に沿って工程設計案を選択できることを示した。さらに、認識した加工フィーチャに基づいて施した工程設計の結果から複合加工機を用いた加工実験を実施し、開発したシステムにより自動的に導出された加工フィーチャで、干渉を起こすことなく想定した形状の創成が可能であることを示した。

iii. 多機能な複合加工機の活用

更なる効率化を目指して、第1旋削主軸と対向する第2旋削主軸や下側刃物台タレットを備えた複合加工機が登場しており、第4章ではその機能を有効に活用するために旋削主軸間での工作物の把持替えするための加工フィーチャ認識手法を考案した。第1旋削主軸側、第2旋削主軸側のそれぞれで加工すべき領域を目標形状から自動的に認識し、各領域で加工フィーチャを認識することで把持替えを含む加工フィーチャの認識を可能とした。さらに、下側刃物台タレットを用いた複数箇所の同時加工を考慮するため、連続する加工フィーチャのうち、想定可能な加工方法が同じで旋削主軸垂直方向に重複しないものを同時に加工する

加工フィーチャとして取り扱う手法を提案した。把持替えと同時加工を含むケーススタディにより提案手法で領域を分割して加工フィーチャを認識できることを確認した。また、加工シミュレーションにより加工時間を予測することで、把持替えと同時加工を考慮した提案手法でより効率的な工程設計案の提示を実現した。

iv. 設計者の意図を反映した工程設計

これまで提案されたきた加工フィーチャとその認識手法の多くは、目標形状や除去領域の面や体積などの幾何学的な情報のみに基づいており、設計者の意図を満足した工程設計とはならない場合があった。3次元モデルを活用した3次元製図に関する規格化が進んでいる近年の動向を参考に、第5章ではコンピュータを用いた工程設計の自動化においても、3次元モデルに付与された幾何公差や表面粗さなどの設計情報を参照することが期待される。本研究では、設計情報が付与された目標形状の面を共有する加工プリミティブは1つに結合することで、加工工程が分割されないようにした。また、複数箇所にも同一の設計情報が付与された場合には、それらを含む加工プリミティブに同一の加工順序を割り当てることで加工工程を集約して加工フィーチャの認識を可能にした。ケーススタディを実施し、従来手法との比較・検討した結果、目標形状に付与された設計情報を参照することで、加工工程の差異を無くして、従来の幾何学的な情報だけでなく、設計情報を参照して加工フィーチャを認識する提案手法の有用性を示した。

今後の展望

本研究では加工フィーチャを自動的に認識し、工程設計を補助する工程設計支援システムを開発したが、システムの実用性を高めるために取り組むべきだと考えられる課題について述べる。

i. 把持替えと同時加工について

本研究では、把持替えを行うべき領域を得るために目標形状から最大の面を利用して領域を分割するための切断面としたが、実際の加工を想定した場合、素材形状と工作機械の位置関係による干渉等についても考慮する必要がある。そのため、工作機械の構造を考慮した加工領域の分割や切断面の選択が求められる。また、開発したシステムでは同時加工すべき加工フィーチャの選択は連続する加工フィーチャから選択されるが、同時加工に適した加工フィーチャの組合せを算出することで、より効率的な工程設計案の導出も可能になると期待される。さらに、把持替えや同時加工を条件として与えるのではなく、作業者の保有する工作機械や工具の情報、また加工戦略などに合わせてより柔軟に決定できるシステムとすべきである。

ii. 複雑形状への対応について

本研究では面取り箇所や自由曲面などの特定形状部を含む複雑形状に対し、これまでに開発したシステムで加工フィーチャを認識するため、特定形状部を取り除く近似と円柱や直方体などの単純形状へ変換して対応する手法を提案した。しかし、工程設計を施す際には元の複雑形状の情報を考慮する必要がある。提案手法でも元の形状へ復元して出力することで対応しているが、それ以外にも工具選択で考慮すべき加工フィーチャ各部の寸法やコーナーRの有無などの情報を加工フィーチャに付与して出力するなどの対処が必要である。また、本研究では3軸制御のマシニングセンタによるミリングを想定して提案手法の基本的な有用性を確認したが、提案手法をターニングなどへ適用することは十分可能である。そこで今後は提案手法を5軸制御のマシニングセンタや複合加工機での多軸・複合加工に対応するためのシステムの拡張と、認識された加工フィーチャへの適切な加工方法や切削条件等の選定が課題となる。

iii. 設計情報の参照について

本研究では、幾何公差や表面粗さなどが設計情報として目標形状に付与されていることを想定して、加工プリミティブの結合や加工工程の集約により設計者の意図を反映させることを目指したが、実際には認識された加工フィーチャに基づいて工程設計を施す場合には、使用する工作機械や加工方法、工具や切削条件の影響は無視できない。そのため、認識された加工フィーチャに付与された設計情報を作業設計などの下流工程へと引き継ぐための仕組みを構築する必要がある。さらに、設計情報に応じて荒加工から仕上げ加工に至る加工工程を決定する必要がある。提案手法では、設計情報が付与された目標形状の面を着色することでそれを認識し、参照して加工フィーチャを認識したが、近年の3次元製図の規格化の取り組みを踏まえ、3次元単独図やDTPD規格に基づいて設計情報を認識することで、設計者の意図をシステム内で判断し、コンピュータを援用した工程設計の自動化が期待される。

参考文献

- 1) 濱田大地, 中本圭一, 石田徹, 竹内芳美, 複合加工機用 CAPP システムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 78, No. 791 (2012), pp. 2698–2709.
- 2) 青山英樹, フレキシブル・オートメーションにおけるコンピュータ支援の現状と展望, システム／制御／情報, Vol. 55, No. 2 (2011), pp. 54–59.
- 3) 白瀬敬一, 変種変量生産に求められる CAM 技術, 計測と制御, Vol. 46, No. 7 (2007), pp. 505–510.
- 4) 竹内芳美, 多軸複合加工の CAM, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 782 (2011), pp. 3544–3551.
- 5) JIS B 0105 : 2012 工作機械—名称に関する用語
- 6) 杉村延広, 工程設計支援システムの現状と将来, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 2 (2006), pp. 165–170.
- 7) Wang, L., Holm, M. and Adamson, G., Embedding a process plan in function blocks for adaptive machining, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 59, Issue 1 (2010), pp. 433–436.
- 8) Márkus, A. and Váncza, J., Process planning with conditional and conflicting advice, CIRP Annals, Vol. 50, Issue 1 (2001), pp. 327–330.
- 9) 韓剛, 白瀬敬一, 若松英史, 妻屋彰, 荒井栄司, 切削加工の目的や環境の変動に柔軟に対応できる工程設計支援システムの開発, 生産加工・工作機械部門講演会：生産と加工に関する学術講演会, (2004), pp. 299–300.
- 10) 深田康平, 白瀬敬一, 若松英史, 妻屋彰, 荒井栄司, 加工目的に柔軟に対応する自動工程設計支援システムの開発, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004), pp. 401–402.
- 11) 奥田容子, 白瀬敬一, 深田康平, 中本圭一, 荒井栄司, フレキシブル工程設計支援システムの開発, 日本機械学会第 6 回生産加工・工作機械部門講演会, No. 6, (2006), pp. 43–44.
- 12) 宇古誠, 奥田容子, 阪口龍彦, 白瀬敬一, 自律型機械加工セルのためのフレキシブル工程設計支援システムの研究, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演, (2009), 6–21.

- 13) 山田昌幸, 森永英二, 若松栄史, 荒井栄司, 柔軟・高効率な機械加工工程設計支援システムに関する研究, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, Vol. 4, No. 9 (2009), pp. 329–330.
- 14) Morinaga, E., Yamada, M., Wakamatsu, H. and Arai, E., Flexible process planning method for milling, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 5, No. 5 (2011), pp.700–707.
- 15) Morinaga, E., Hara, T., Joko, H., Wakamatsu, H. and Arai, E., Improvement of computational efficiency in flexible computer-aided process planning, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 8, No. 3 (2014), pp.396–405.
- 16) Sakurai, H. and Dave, P., Volume decomposition and feature recognition; part 1-polyhedral objects, *Computer-Aided Design*, Vol. 27, Issue 11 (1995), pp. 793–869.
- 17) Sakurai, H. and Dave, P., Volume decomposition and feature recognition, part II: curved objects, *Computer-Aided Design*, Vol. 28, Issues 6–7 (1996), pp. 519–537.
- 18) Woo, Y., Wang, E., Kim, Y. S. and Rho, H. M., A hybrid feature recognizer for machining process planning systems, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 1 (2005), pp. 397–400.
- 19) Kailash, S.B., Zhang, Y.F. and Fuh, J.Y.H., A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components, *Computer-Aided Design*, Vol. 33, Issue 8 (2001), pp. 605–617.
- 20) Kim, Y.S., Recognition of from features using convex decomposition, *Computer-Aided Design*, Vol. 24, Issue 9 (1992), pp. 461–476.
- 21) Wang, E. and Kim, Y.S., Form feature recognition using convex decomposition: results presented at the 1997 ASME CIE Feature Panel Session, *Computer-Aided Design*, Vol. 30, Issue 13 (1998), pp. 983–989.
- 22) Miao, H.K., Sridharan, N. and Shah, J.J., CAD-CAM integration using machining features, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15, Issue 4 (2002), pp. 296–318.
- 23) Dong, J. and Vijayan, S., Features extraction with the consideration of manufacturing processes, *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 8 (1997), pp. 2135–2155.
- 24) Nagaraj, H.S. and Gurumoorthy, B., Automatic extraction of machining primitives with respect to preformed stock for process planning, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 20,

- No. 3 (2001), pp.210–222.
- 25) 西田勇, 平井大志, 佐藤隆太, 白瀬敬一, CAM 操作者の意図を考慮したエンドミル加工用自動工程設計システム, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 860 (2018), DOI:10.1299/transjsme.17-00563.
- 26) 西田勇, 白瀬敬一, 作業条件を考慮したエンドミル加工用自動工程設計システム (第 1 報 工具交換回数の最小化), 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866 (2018), DOI:10.1299/transjsme.18-00242.
- 27) Zhu, J., Kato, M., Tanaka, T., Yoshioka, H. and Saito, Y., Graph based automatic process planning system for multi-tasking machine, Bulletin of the JSME, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 9, No. 3 (2015), DOI:15-00296.
- 28) Dwijayanti, K. and Aoyama, H., Basic study on process planning for turning-milling center based on machining feature recognition, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 8, No. 4 (2014), DOI:10.1299/jsmdsm.2014jamdsm0058.
- 29) Dwijayanti, K. and Aoyama, H., Development of automatic process planning system for turning-milling center with 2 turret system, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 81, No. 5 (2015), pp. 471–480.
- 30) 清岡李里子, Khusna Dwijayanti, 青山英樹, マルチタレット型複合加工機のための自動工程設計・NC プログラム生成システム, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 9 (2017), pp. 878–882.
- 31) 上野瑛, 中本圭一, 複合加工機用工程設計支援システムのための加工フィーチャの提案, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00108.
- 32) K. Koremura, Y. Inoue, K. Nakamoto, Machining process evaluation indices for developing a computer aided process planning system, Int. J. of Automation Technology, Vol. 11, No. 2 (2017), pp. 242–250.
- 33) 白瀬敬一, CAM-CNC 統合による柔軟性を備えた工作機械の将来像, 計測と制御, Vol. 52, No. 1 (2013).
- 34) 島田宏美, JAMA におけるデジタル製品技術文書情報の標準化活動, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 8 (2017), pp. 727–731.
- 35) 藤沼知久, 一般社団法人電子情報技術産業協会三次元 CAD 情報標準化専門委員会での DTPD の取り組み, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 8 (2017), pp. 722–726.
- 36) 金田徹, DTPD (3D 製図) 規格 (その現状と今後), 精密工学会誌, Vol. 83, No. 8 (2017), pp. 717–721.

- 37) JIS B 0060-1 : 2015 デジタル製品技術文書情報—第 1 部 : 総則
- 38) JIS B 0060-2 : 2015 デジタル製品技術文書情報—第 2 部 : 用語

謝 辞

はじめに、研究活動全般にわたり、中本圭一准教授ならびに笹原弘之教授には大変お世話になりました。また、桑原利彦教授、夏恒教授、水内郁夫准教授にはお忙しいところ副査をお引き受けいただき、深く感謝申し上げます。

中本圭一准教授には学部の時から5年間大変お世話になりました。お忙しいにも関わらず積極的に私達学生とのコミュニケーションを図ってくださり、研究に関する相談や細やかなご指導を頂いた中で研究を進めることができました。様々な講習会や国内学会や国内外での国際会議への出席、機械学会のRC研究分科会では協力委員として様々な企業や大学の方々との交流の機会を頂くなど、身に余る数多くの経験をさせていただくことで自身の知見を広めることができました。また、論文執筆や講演原稿などの作成では、私の拙い文章や英文を休日や昼夜を問わず何度も確認と修正をしていただきました。また、学振の申請書はドイツにいらっしゃったにもかかわらず何度も添削していただき、おかげで最後の1年はDC2に採用されました。心より感謝しております。就職することを決め、大学からは離れますが、近いところにおりますので今後とも関わる機会も多いかと存じます。今後ともご指導ご鞭撻いただければ幸いです。

笹原弘之教授には、学部では輪講で、大学院進学後は大学院セミナーで研究についての確なご指摘を頂き研究を進めることができました。また、博士後期課程へ進学してからも研究では厳しいご指摘を頂くこともあった反面、研究室旅行や行事では中本研究室の私たちにも気さくに接してくださいました。

本研究室OBの先輩方には、研究生活を始める上で基本的な知識を教示していただき、大変お世話になりました。また、先に卒業・修了していった同期や後輩たちにも大変感謝しています。一緒に勉強し、また研究においては互いの研究内容についてアドバイスし合えたことはとても良い刺激になりました。

中本研究室の皆様にも大変感謝しております。思い返すと現修士2年のメンバーとは研究も遊びも一番接する時間が長かったように感じます。大学を離れてからも変わらず接してもらえると嬉しく思います。また今年は小部屋に移籍したのでなかなか直接話す時間が作れず、同じテーマの後輩たちとも交流が少なくなってしまい残念でしたが、私の研究が今後の研究を進めるうえで一助になればうれしいです。

茅野雅久技術職員、笹原研究室の皆様にも大学院セミナーや各種行事で大変お世話になりました。

浅野哲也氏をはじめアイコクアルファ株式会社の方々にはシステムを実装するにあたり，API 機能や ESPRIT の使い方について様々なサポートを頂きました．心より感謝いたします．私の作成したシステムがどこかで役立つことがあれば嬉しく存じます．

本研究の一部は（公財）工作機械技術振興財団 プロジェクト研究 RU-07，および科研費（特別研究員奨励費 JP19J13717）の助成を受けて実施されました．ここに記して感謝の意を表します．

最後に，私のことを信じてここまで見守ってくれた家族に感謝します．

付 録

いくつかの異なるケーススタディの結果を示す。図 1 に示す素材形状と目標形状を入力情報として加工方向を維持しながら加工順序を設定して加工フィーチャを認識した結果を表 1 にまとめて示す。

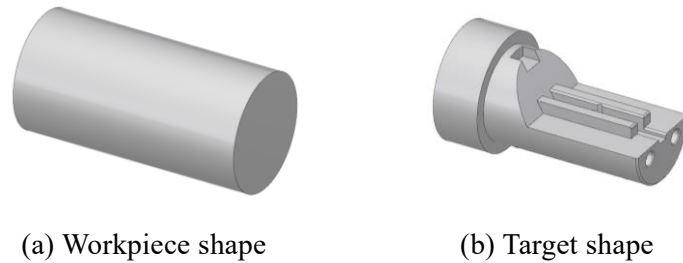


Fig. 1 Input information

Table 1 Result of machining feature recognition

Seq. 1 (B)	Seq. 2 (B)+(a)	Seq. 3 (K)
Seq. 4 (L)	Seq. 5 (L)	Seq. 6 (L)
Seq. 7 (A)	Seq. 8 (J)	Seq. 9 (C)
Seq. 10 (C)	Seq. 11 (C)	Seq. 12 (C)
Seq. 13 (C)	Seq. 14 Fillet	Seq. 15 Chamfer

図 2 に示す素材形状と目標形状を入力情報として，創成面の数が少ないものから順番に加工順序を割り当てて加工フィーチャを認識した結果を表 2 にまとめて示す。

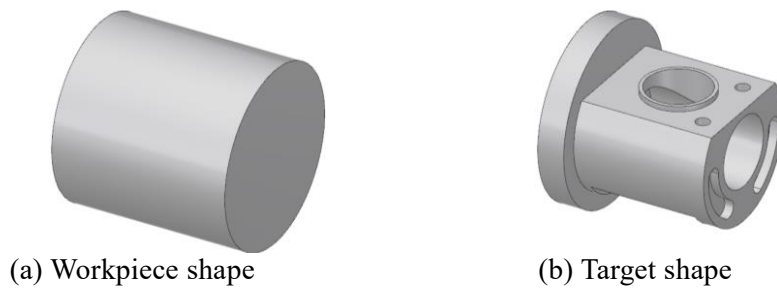


Fig. 2 Input information

Table 2 Result of feature recognition and process planning

Machining sequence 1		Machining sequence 2		Machining sequence 3	
Type of machining feature: (B)		Type of machining feature: (B) + (a)		Type of machining feature: (K)	
Tool	Turning tool	Tool	Turning tool	Tool	Square end mill (ϕ 30 mm)
Cutting speed	200 m/min	Cutting speed	200 m/min	Speed	300 min^{-1}
Feed rate	0.3 mm/rev	Feed rate	0.3 mm/rev	Feed	75 mm/min
				Depth of cut	5 mm
Machining sequence 4		Machining sequence 5		Machining sequence 6	
Type of machining feature: (J)		Type of machining feature: (K) + (b)		Type of machining feature: (C)	
Tool	Square end mill (ϕ 30 mm)	Tool	Square end mill (ϕ 12 mm)	Tool	Square end mill (ϕ 30 mm)
Speed	300 min^{-1}	Speed	750 min^{-1}	Speed	750 min^{-1}
Feed	75 mm/min	Feed	125 mm/min	Feed	125 mm/min
Depth of cut	5 mm	Depth of cut	2 mm	Depth of cut	5 mm
Machining sequence 7		Machining sequence 8		Machining sequence 9	
Type of machining feature: (A)		Type of machining feature: (C)		Type of machining feature: (C)	
Tool	Square end mill (ϕ 30 mm)	Tool	Drill (ϕ 8 mm)	Tool	Drill (ϕ 8 mm)
Speed	300 min^{-1}	Speed	3600 min^{-1}	Speed	3600 min^{-1}
Feed	75 mm/min	Feed	720 mm/min	Feed	720 mm/min
Depth of cut	5 mm				
Machining sequence 10		Machining sequence 11			
Type of machining feature: (G)		Type of machining feature: (G)			
Tool	Square end mill (ϕ 6 mm)	Tool	Square end mill (ϕ 6 mm)		
Speed	1500 min^{-1}	Speed	1500 min^{-1}		
Feed	100 mm/min	Feed	100 mm/min		
Depth of cut	1 mm	Depth of cut	1 mm		

図 3 に示す素材形状と目標形状を入力情報として，創成面の数が少ない順に，把持替えも同時加工も含まず加工フィーチャを認識した結果，把持替えを含んで加工フィーチャを認識した結果，把持替えと同時加工を含んで加工フィーチャを認識した結果を表 3，表 4，表 5 にそれぞれ示す。

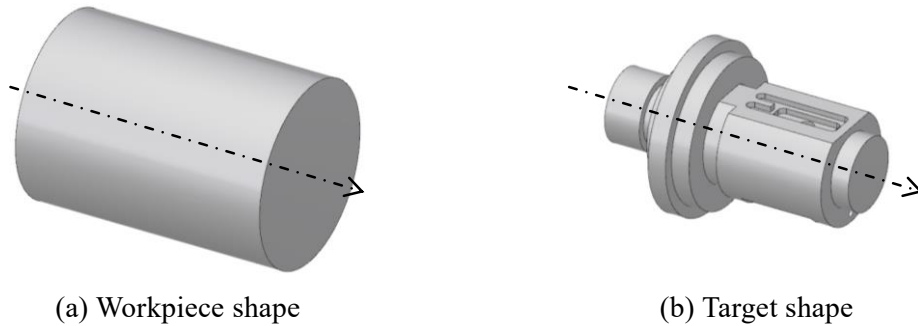


Fig. 3 Input information

Table 3 Result of machining feature recognition (w/o chucking switch, w/o parallel machining)

Seq. 1 (B) + (a)	Seq. 2 (B) + (a)	Seq. 3 (B) + (a)	Seq. 4 (B) + (a)	Seq. 5 (B) + (a)
Seq. 6 (K)	Seq. 7 (B) + (a)	Seq. 8 (D) + (a)	Seq. 9 (J)	Seq. 10 (D) + (a)
Seq. 11 (G)	Seq. 12 (A)	Seq. 13 (G)	Seq. 14 (A)	Seq. 15 (G)

Table 4 Result of machining feature recognition (w/ chucking switch, w/o parallel machining)

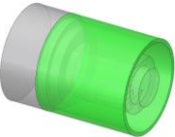

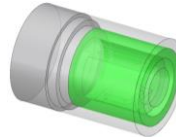
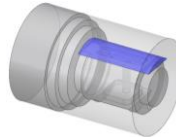
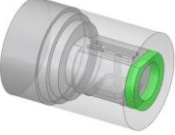


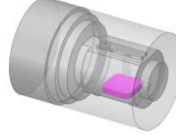
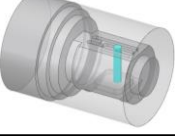
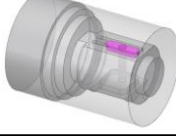

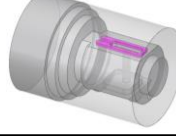
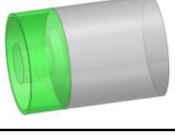
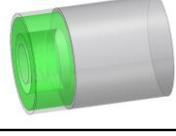
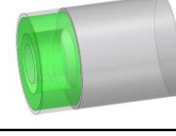
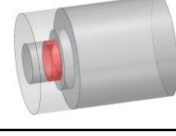
Seq. 1 (B) + (a)	Seq. 2 (B) + (a)	Seq. 3 (B) + (a)	Seq. 4 (K)
			
Seq. 5 (B) + (a)	Seq. 6 (D) + (a)	Seq. 7 (J)	Seq. 8 (G)
			
Seq. 9 (A)	Seq. 10 (G)	Seq. 11 (A)	Seq. 12 (G)
			
Seq. 13 (B) + (a)	Seq. 14 (B) + (a)	Seq. 15 (B) + (a)	Seq. 16 (D) + (a)
			

Table 5 Result of machining feature recognition (w/ chucking switch, w/ parallel machining)

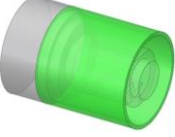
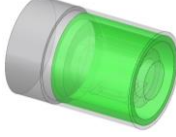
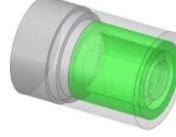
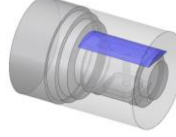
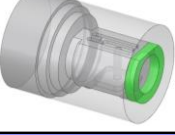


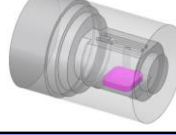
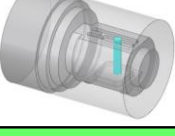
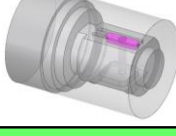

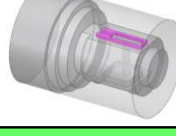
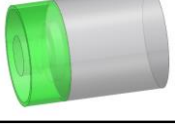
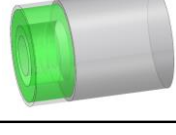
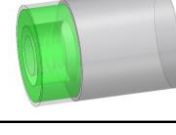
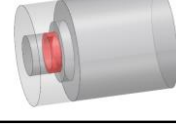
Seq. 1 (B) + (a)	Seq. 2 (B) + (a)	Seq. 3 (B) + (a)	Seq. 4 (K)
			
Seq. 5 (B) + (a)	Seq. 6 (D) + (a)	Seq. 7 (J)	Seq. 8 (G)
			
Seq. 9 (A)	Seq. 10 (G)	Seq. 11 (A)	Seq. 12 (G)
			
Seq. 13 (B) + (a)	Seq. 14 (B) + (a)	Seq. 15 (B) + (a)	Seq. 16 (D) + (a)
			

図 4 の素材形状と目標形状を入力情報として、同図 (c) の設計情報を参照して加工フ
ィーチャを認識した結果を表 6 にまとめて示す。

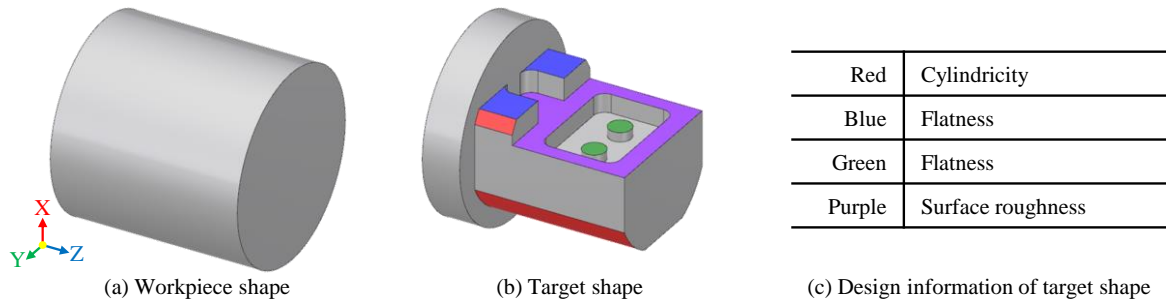


Fig. 4 Input information

Table 6 Result of machining feature recognition

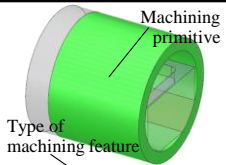
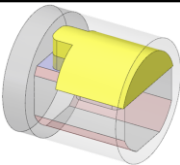
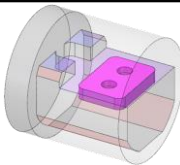
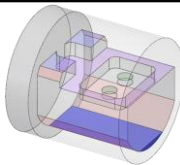
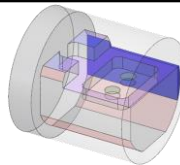
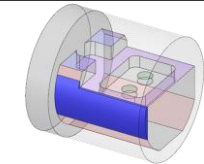
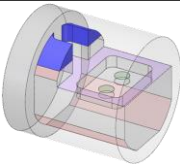
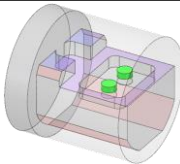
Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4	Sequence 5
 <p>Machining primitive Type of machining feature (B) Face C + Boss C</p>	 <p>(L) Closed slot</p>	 <p>(G) Closed pocket</p>	 <p>(K) Step</p>	 <p>(K) Step</p>
Sequence 6	Sequence 7	Sequence 8		
 <p>(K) Step</p>	 <p>(K) Step</p>	 <p>(F) Face P</p>		

図 5 の素材形状と目標形状を入力情報として，同図 (c) の設計情報を参照して加工フィーチャを認識した結果を表 7 に示す。

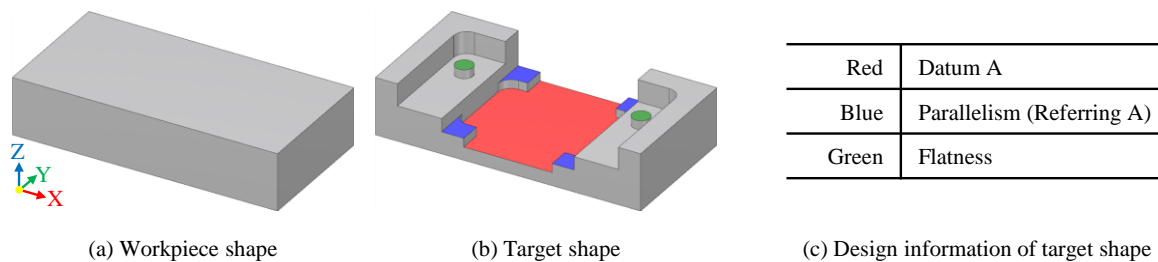
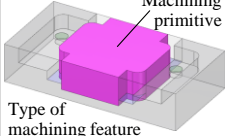
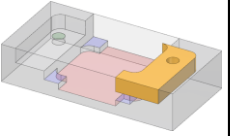
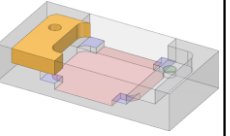
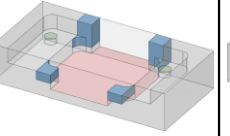
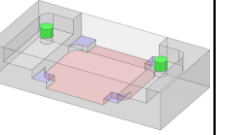


Fig. 5 Input information

Table 7 Result of machining feature recognition

Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4	Sequence 5
 <p>(G) Closed pocket</p>	 <p>(I) Open pocket</p>	 <p>(I) Open pocket</p>	 <p>(J) Open slot</p>	 <p>(F) Face P</p>