

令和 4 年度学位(博士)論文

製品製造情報を利用した  
工程設計支援システムの開発に関する研究

指導教員 中本 圭一 教授

東京農工大学  
工学府 機械システム工学専攻

平成 30 年度入学

18833001

浅野 哲也

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>緒論</b> .....	<b>1</b>
1.1	工業的・工学的背景 .....	1
1.2	本研究の目的 .....	7
1.3	本論文の構成 .....	8
<b>第 2 章</b>	<b>工程設計支援のための加工フィーチャの認識</b> .....	<b>11</b>
2.1	はじめに .....	11
2.2	加工フィーチャの認識 .....	11
2.2.1	除去領域と境界面の延長 .....	11
2.2.2	加工プリミティブの取得と分類 .....	12
2.2.3	加工フィーチャの認識 .....	14
2.3	荒加工用の加工フィーチャの認識 .....	17
2.3.1	製品製造情報が指示された加工プリミティブの結合 .....	17
2.3.2	複数加工プリミティブを包括する加工フィーチャの認識 ..	18
2.4	加工工程の評価 .....	19
2.5	おわりに .....	20
<b>第 3 章</b>	<b>製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識</b> .....	<b>23</b>
3.1	はじめに .....	23
3.2	荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識の流れ .....	23
3.3	3次元 CAD モデルへの製品製造情報の付加 .....	24
3.4	仕上げ加工用の加工フィーチャの導入 .....	25
3.5	指示された製品製造情報からの参照面の決定 .....	26
3.6	荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識 .....	28
3.7	ケーススタディ .....	30
3.8	おわりに .....	37
<b>第 4 章</b>	<b>加工フィーチャを用いた事例ベース推論による作業情報の推定</b> .....	<b>39</b>

4.1	はじめに	39
4.2	工具情報と工具情報データベース	39
4.3	作業情報と作業情報データベース	40
4.4	作業情報の推定の流れ	43
4.5	類似の作業情報の検索	45
4.5.1	類似の作業情報の検索器	45
4.5.2	加工フィーチャの種類の種類度の導出	48
4.5.3	加工フィーチャの寸法の種類度の導出	49
4.5.4	ワークの材料の種類度の導出	50
4.6	作業情報の推定	51
4.7	作業情報の推定のケーススタディ	57
4.8	推定した作業情報の蓄積	69
4.9	推定した作業情報の蓄積のケーススタディ	69
4.10	製品製造情報を反映した作業情報の推定	75
4.11	製品製造情報を反映した作業情報の推定のケーススタディ	76
4.12	推定した作業情報からの NC プログラムの自動生成	79
4.13	おわりに	82
<b>第 5 章</b>	<b>工程選択に向けた機械学習による加工時間の推定</b>	<b>85</b>
5.1	はじめに	85
5.2	従来の加工時間の推定	85
5.3	機械学習を利用した加工時間の推定	87
5.4	ケーススタディ	95
5.5	おわりに	98
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>99</b>
	<b>今後の展望</b>	<b>101</b>
	<b>参考文献</b>	<b>103</b>
	<b>謝辞</b>	<b>107</b>

---

---

# 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，コンピュータを利用した技術が様々な分野で急速に普及し，発展している．製造業においても，製品の開発や設計，生産設計，生産管理，検査など，コンピュータの利用範囲は多岐にわたっている．例えば，製品の開発や設計においては，3次元CAD (Computer Aided Design) ソフトウェアが用いられ，製品の部品の形状をソリッドモデルで表現することにより，複雑な部品の形状を容易にモデリングできるようになっている．また，生産設計においては，CAM(Computer Aided Manufacturing) ソフトウェアが用いられ，3次元CADソフトウェアでモデリングされた部品の形状から数値制御工作機械で加工するために必要なNC(Numerical Control) プログラムを容易に生成できるようになっている<sup>1)</sup>．一方で，製造業の生産形態は，少品種大量生産から多品種少量生産へと推移している．また，航空機や自動車などの高機能化に伴い，部品の形状が複雑化する傾向にある．こういった背景から，近年では，加工現場では，より効率的な生産システムの構築が求められており，生産リードタイムを短縮することが重要となっている．また，近年では，部品の切削加工を行う数値制御工作機械も多機能化，高性能化しており，生産リードタイムを短縮する取り組みの一例として，旋盤と5軸制御マシニングセンタの両方の機能を併せ持つ図1.1のような複合加工機を用いることで，加工工程を集約することが挙げられる．

しかし，複合加工機では，複数の加工方法が選択可能で，駆動軸にも自由度が増える一方，工程設計が複雑化するため，生産リードタイムにおける加工工程を開始するまでの準備時間の割合が増加する傾向にある．そのため，生産リードタイムを短縮し，より効率的な生産システムを構築するためには，この準備時間を短縮することが重要となっている．数値制御工作機械による部品の切削加工において，CAMソフトウェアが導入され，数値制御工作機械を運転するためのNCプログラムを生成する作業は効率化した．しかしながら，市販のCAMソフトウェアで課題となるのが，切削条件や使用工具などの作業情報（作業情報に関しては第4章で詳細を述べる）のCAMソフトウェアへの入力である．加工箇所，加工順序，切削条件や使用工具など作業情報は，依然として，3

次元 CAD ソフトウェアでモデリングされた部品の形状や図面を用いて、作業者の知識や経験といった技能に基づいて検討されることが多く、標準化が進んでいない。また、これらの作業情報は、依然として、CAM ソフトウェアへの手動での入力を作業者に委ねており、作業者に時間的負担を強いているのが現状である。そこで、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支援する、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。また、工程設計支援システムは、特定の CAM に依存しないことが求められている。

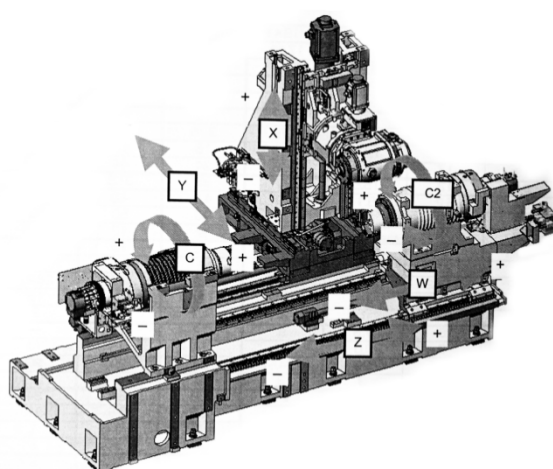


Fig. 1.1 Multi-tasking machine tool

3次元 CAD ソフトウェアを用いて生成される部品の形状などの3次元 CAD モデルを、製造業における製品の開発や設計、生産設計、生産管理、検査で連携させて使用することで、生産性の向上、開発中の設計変更の減少といった効果が見られている<sup>2)</sup>。しかしながら、実際の加工現場では、3次元 CAD モデルに併せて、寸法公差や幾何公差、表面性状などの製品製造情報を含む2次元図面を用いることが多く、製品の開発や設計から検査までの間に3次元 CAD モデルと2次元図面で情報の受け渡しを何度も行う必要がある<sup>3)</sup>。この情報の受け渡しの際は、作業者による解釈や手入力などが介在することが多く、生産リードタイムの増加や、情報の不整合の原因となる可能性がある。そこで、3次元 CAD モデルをより有効活用するモデルベース定義 (MBD: Model Based Definition) が様々な業界で普及し始めている<sup>4)</sup>。モデルベース定義では、寸法公差や幾何公差などの非幾何的な情報を製品製造情報 (PMI: Product Manufacturing Information) と呼び、注釈として3次元 CAD モデルに付加している。モデルベース定義の導入により、2次元図

面を作成する必要がなくなり、製品の開発のコストや時間の削減が期待されている。例として、Fang らは、製品製造情報をベースとした寸法の管理の実現を目指して、GD&T セマンティックモデルにモデルベース定義を使用することを提案している<sup>5)</sup>。Cicconi らは、注釈のモデリングに要する時間を短縮する手法として、製品製造情報を用いて、類似した3次元CADモデルから注釈を受け渡すことを提案している<sup>6)</sup>。Urbasa らは、製品製造情報を拡張現実で表示することで、製品を検査する手法を提案している<sup>7)</sup>。Peng らは、製品製造情報を定義するオントロジーを確立し、製品製造情報の相互運用や適合性をチェックする手法を提案している<sup>8)</sup>。日本自動車工業会 (JAMA) では、製図の専門家などの意見を取り入れ、デジタル製品技術文書 (DTPD) の標準化に取り組まれている<sup>9)</sup>。電子情報技術産業協会 (JEITA) では、3D 単独図と呼ばれる、3次元製図に関する団体規格が制定され、運用されている<sup>10)</sup>。さらに、JEITA 三次元CAD情報標準化専門委員会は、団体規格に止まらず、3次元CADモデルの作成者や使用者の利便性を向上させるため、3次元製図を標準化して表記方法を規定し、製品製造情報が付加された3次元CADモデルを3次元製品情報付加モデル (3DA モデル: 3D annotated model) として定義している<sup>11)</sup>。図 1.2 に3次元製品情報付加モデルの一例を示す。

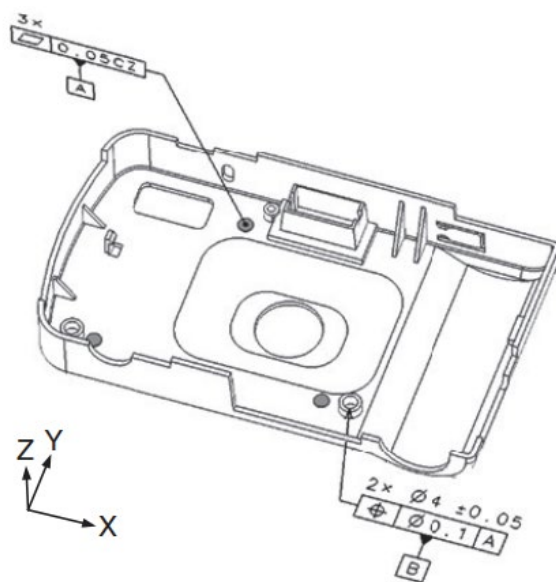
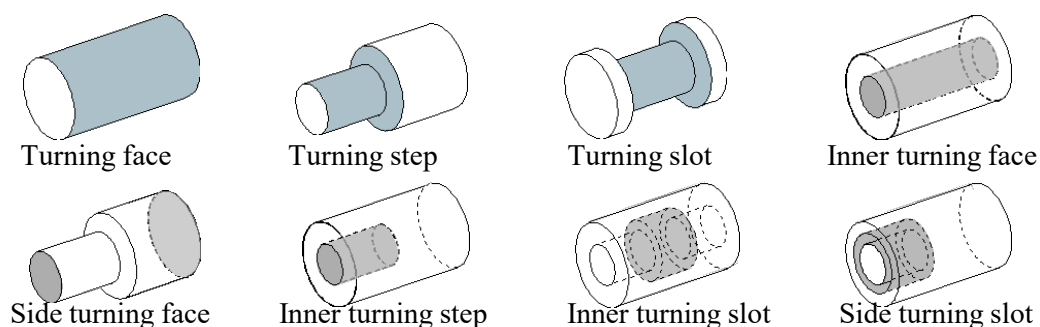


Fig. 1.2 Example of 3D annotated model<sup>12)</sup>

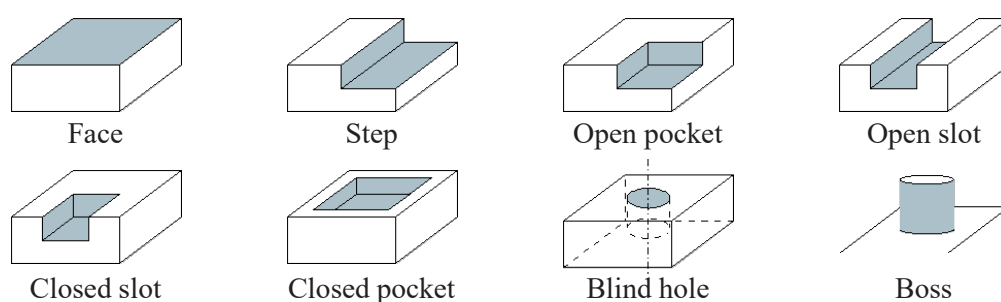
コンピュータを援用した工程設計支援システムの開発では、3次元CADモデルから加工フィーチャと呼ばれる加工工程を特徴付ける領域を認識した形状を用いて、加工箇所や加工順序などを自動的に提案後、切削条件や使用工具などの作業情報を自動的に推定し、推定された作業情報をCAMソフトウェアに自動的に入力後、CAMソフトウェアで

NC プログラムを自動的に生成することで、加工準備時間を短縮する<sup>13)</sup>。加工フィーチャの認識に関しては第2章と第3章で詳細を述べる。作業情報やその推定に関しては第4章で詳細を述べる。

加工フィーチャは、これまでに多くの認識手法が提案されている<sup>14)~17)</sup>。Kimらは、部品の目標形状の面や辺から取得した加工フィーチャの目標形状への追加を繰り返すことでワークの形状に近づける手法を提案した<sup>18)</sup>。Sakuraiらは、除去領域が公差する加工フィーチャを和集合として表現する手法や、部品の目標形状の凸部から最大の除去領域を用いて、加工フィーチャを認識する手法を提案し<sup>19)~20)</sup>、その手法を用いてWooらは工程設計支援システムを開発している<sup>21)</sup>。LiらやRahmaniらは、部品の目標形状の面や辺をグラフ表現し、グラフ分析により加工フィーチャを認識する手法を提案した<sup>22)~23)</sup>。Zhuらは、部品の目標形状の面、辺や面同士の凹凸関係をグラフ表現し、グラフ分析により加工フィーチャを認識するシステムを開発した<sup>24)</sup>。清岡らは、除去領域を構成する面で分割される形状と部品の目標形状との関係から認識される加工フィーチャを、加工フィーチャが属する面を加工するタレットを割り当てる、複数タレットの複合加工機に対応した自動工程設計支援システムを開発した。西田らは、除去領域の実加工に適した面を用いて、分割した除去領域に加工順序を割り当てる工程設計支援システムを開発した<sup>25)</sup>。Sunilらは、フィーチャパターンを学習したニューラルネットワークを用いて、加工フィーチャを認識する手法を提案した<sup>26)</sup>。また、濱田らは、3次元CADソフトウェア上でモデリングした部品の目標形状を構成する面から認識する加工フィーチャを図1.3のように提案した<sup>1)</sup>。



(a) Machining features for turning



(b) Machining features for milling

Fig. 1.3 Recognized machining features from target shape of parts<sup>1)</sup>

提案された加工フィーチャは、ターニング用とミリング用が用意されており、旋盤と5軸制御マシニングセンタの両方の機能を併せ持つ図1.1のような複合加工機を対象に工程設計支援システムが開発された。しかしながら、提案された加工フィーチャには、三つの課題がある。一つ目の課題は、加工フィーチャに対する加工方法が一意に決定されていることである。図1.3(a)のTurning stepにはターニングが一意に決定されているが、実際の複合加工機では、ミルターン加工も可能である。また、Inner turning faceやInner turning stepなどもターニングが一意に決定されているが、実際の複合加工機では、穴径によっては、ドリル加工も可能である。よって、加工フィーチャに対する加工方法の一意の決定は好ましくない。二つ目の課題は、多くの研究と同じように、部品の目標形状に対して加工フィーチャを認識することである。除去領域は、ワークの形状によって図1.4に示すように変化する。



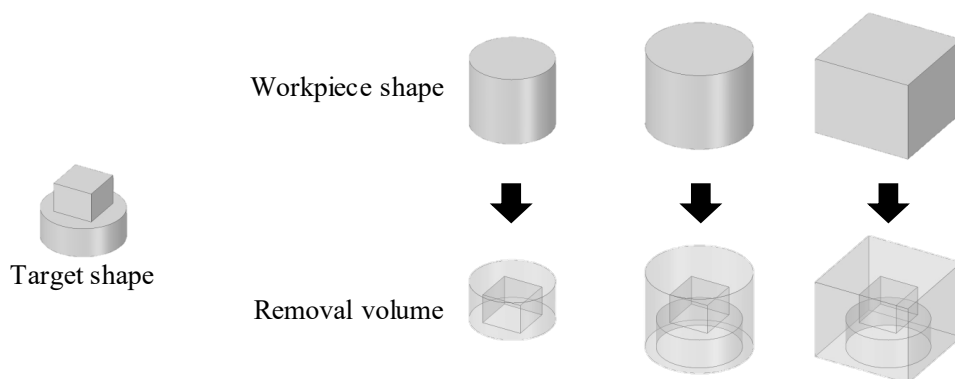


Fig. 1.4 Difference of removal volume based on workpiece

除去領域は、加工箇所や加工順序などの提案に影響するため、ワークの形状を考慮した除去領域から加工フィーチャを認識する必要がある。三つ目の課題は、部品目標形状に指示された幾何公差などを満たす部品を加工するためには、部品の目標形状に指示された製品製造情報を利用して工程設計する必要があるが、製品製造情報は無視されており<sup>27)</sup>、また、加工フィーチャを認識する手法に仕上げ加工を対象とした研究においても、製品製造情報が利用されていない<sup>28)-29)</sup>。一方、上野らは、一つ目と二つ目の課題に対し、複合加工機による加工を対象に、ワークの形状と部品の目標形状の差として抽出される除去領域を分割して、加工プリミティブ取得し、加工プリミティブに対する加工フィーチャを認識し、加工方法を一意に決定しない手法を提案している<sup>30)</sup>。これにより、加工箇所や加工順序を自動的に提案でき、加工準備時間を短縮できた。井上らは、上野らが提案した加工フィーチャで表せない、面取りや自由曲面などといった複雑な形状を内包する円柱や直方体の加工フィーチャとして認識する手法や、三つ目の課題に対し、部品の目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用して荒加工用の加工フィーチャを認識する手法を提案している<sup>31)-32)</sup>。また、惟村らは、加工精度、環境負荷や加工時間を指標として、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程を評価する手法を提案した<sup>33)</sup>。加工フィーチャの認識により、加工箇所や加工順序を自動的に提案でき、加工準備時間を短縮できた。しかし、その後の作業設計における、切削条件や使用工具などの作業情報は、作業者の知識や経験といった技能に基づいて検討されることが多く、標準化が進んでいないため、経験の浅い作業者が、切削条件や使用工具などの作業情報を検討することは、作業者の大きな負担となっている。そのため、切削条件や使用工具などの作業情報を自動的に推

定する手法は、これまでに多く提案されている<sup>34)~36)</sup>。椎木らやNishidaらは、認識された加工フィーチャと類似する加工フィーチャの作業情報を用いてNCプログラムを生成する手法を提案した<sup>37)~38)</sup>。しかしながら、類似する加工フィーチャの切削条件などの作業情報を、認識された加工フィーチャに合うように修正する作業は、作業者に委ねられており、作業者の負担となっている。また、長野らは、切削条件などの作業情報を事例ベース推論により推定する手法を提案した<sup>39)</sup>。しかしながら、作業設計支援には、切削条件などの推定だけでは不十分であり、使用工具など作業情報の推定が必要である。

## 1.2 本研究の目的

1.1 節で述べた井上らの提案は、部品の目標形状の面に指示された製品製造情報について、同じ製品製造情報が指示された面を同じ工程で加工するために、加工プリミティブを結合するなどして、加工フィーチャに製品製造情報を利用した。しかしながら、井上らの提案では、対象とする製品製造情報が、部品の目標形状の面に指示される表面粗さに限定されており、例えば、辺に指示された寸法公差には対応していない。また、対象とする加工フィーチャが、荒加工に限定されており、表面粗さなどの製品製造情報を満たすことが困難になる場合がある。さらに、製品製造情報が認識された加工フィーチャに受け渡されておらず、作業設計時に加工フィーチャから製品製造情報を参照することができないため、表面粗さなどの製品製造情報を満たす切削条件等を検討することが困難になる場合がある。そこで、本研究では、仕上げ加工を対象とした仕上げ加工用の加工フィーチャを導入する。また、製品製造情報を目標形状、除去領域、加工プリミティブや加工フィーチャへと受け渡し、受け渡された製品製造情報を参照することで、仕上げ加工を含む加工工程に対応した加工フィーチャを認識する。加えて、作業設計時に加工フィーチャから製品製造情報を参照することで、部品の目標形状に指示された製品製造情報を満たす加工工程を設計できるようにする。

さらに、1.1 節で述べたように、切削条件や使用工具などの作業情報は、作業者の知識や経験といった技能に基づいて検討されることが多く、標準化が進んでいないため、経験の浅い作業者が、切削条件や使用工具などの作業情報を検討することは、作業者の大きな負担となっている。そこで、本研究では、先行研究<sup>30)~31)</sup>で認識された加工フィーチャを用いて、切削条件などだけでなく使用工具なども含めた作業情報を自動的に推定することで、経験の浅い作業者が、CAMソフトウェアでのNCプログラムの生成に必要な切削条件や使用工具などの作業情報を検討する負担を軽減する。また、解決す

る問題と類似した過去の事例を修正することで解を得る、事例ベース推論を用いて、作業情報を修正することで、作業情報を自動的に推定するため、作業情報に含まれる加工現場特有のノウハウを利用できる<sup>40)</sup>。また、推定された作業情報を、新たな作業情報として蓄積することができ、蓄積された新たな作業情報も、切削条件や使用工具などの作業情報の推定に利用されるようにするために、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度を自動的に更新する。これにより、新たな作業情報を加工現場特有の新たな加工ノウハウとして利用でき、加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進する。また、ケーススタディにより、作業情報の推定の有効性を検証した結果について述べる。

加えて、1.1 節で述べたように、ワークの形状と部品の目標形状の差として抽出される除去領域を分割して、加工プリミティブを取得し、加工プリミティブに対する加工フィーチャを認識し、加工箇所や加工順序を自動的に提案する。しかしながら、1.1 節で述べた加工フィーチャの認識は、認識の自由度が高い一方、認識される加工フィーチャの組み合わせが複数のパターンとなるため、候補となる加工箇所や加工順序の組合せは膨大となる。作業情報の推定により自動的に推定される切削条件や使用工具などの作業情報を用いても、市販の CAM ソフトウェアの NC プログラムの生成に時間がかかるため、膨大な加工箇所や加工順序の組合せから、所望の加工箇所や加工順序の選択に時間を要することとなる。そこで、本研究では、膨大な加工箇所や加工順序の組合せからの所望の加工箇所や加工順序の選択に必要な定量的評価指標を加工時間とし、機械学習を用いて、作業情報から高速に加工時間を推定する。

### 1.3 本論文の構成

- 第1章「緒論」では、工業的・工学的背景、本研究の目的、本論文の構成について述べる。
- 第2章「工程設計支援のための加工フィーチャの認識」では、工程設計支援システムの開発において、中核となる加工フィーチャの認識に関する従来研究について述べる。また、特に関連する先行研究として、除去領域から加工プリミティブを取得し、加工順序を割り当てることで加工フィーチャを認識する方法の詳細について述べる。
- 第3章「製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識」では、製品製造情報を反映できる仕上げ加工に向けた新たな加工フィーチャの導入について述べる。これまでに

提案されている加工フィーチャは、荒加工のみを対象としており、取り扱える製品製造情報も表面粗さに限定されていた。また、製品製造情報が加工フィーチャに紐づいていないため、作業設計時に製品製造情報を参照できなかった。そこで、仕上げ加工を対象とした新たな加工フィーチャを導入する。また、受け渡された製品製造情報を参照することで、仕上げ加工を含む一連の加工工程を対象に作業設計を施す方法を考案し、ケーススタディを実施して、その有用性を検証している。

- 第4章「加工フィーチャを用いた事例ベース推論による作業情報の推定」では、工程設計の自動化に向けて、上記の製品製造情報が紐づいた加工フィーチャを利用した作業情報の推定方法について説明する。切削条件や使用工具などの作業情報は、作業者の技能に強く依存して決定されており、標準化が進んでいない。また、決定した作業情報のCAMソフトウェアへの入力を作業者に委ねており、時間的負担を強いている。そこで、認識された加工フィーチャを用いて、事例ベース推論により作業情報を推定し、CAMソフトウェアを用いてNCプログラムを自動的に生成する。実施したケーススタディにより、仕上げ加工の有無に応じて異なる作業情報を推定できることを確認している。
- 第5章「工程選択に向けた機械学習による加工時間の推定」では、認識された加工フィーチャを利用した機械学習による加工時間の推定方法を説明する。加工工程の評価指標の一つである加工時間を、CAMソフトウェアで生成されるNCプログラムから計算するには、加工工程の候補が膨大なため、相当の時間が不可欠になる。結果として、加工フィーチャの認識により算出される加工工程案の選択に時間を要する。そこで、認識された加工フィーチャを利用して、機械学習により高速に加工時間を推定する方法を考案し、ケーススタディにより、高速に高い精度で加工時間を推定できることを確認している。
- 第6章「結論」では、各章で得られた結果のまとめについて述べる。



---

---

# 第2章

## 工程設計支援のための 加工フィーチャの認識

---

---

### 2.1 はじめに

第1章では、ワークの形状と部品の目標形状から加工フィーチャと呼ばれる加工工程を特徴付ける領域を認識し、認識した加工フィーチャを用いて加工箇所や加工順序を自動的に提案する工程設計支援システムが求められることについて述べた。本章では、上野らが提案した、加工フィーチャ認識、井上らが提案した、部品の目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用した荒加工用の加工フィーチャ認識、惟村らが提案した、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程から所望の加工工程を選択するための加工工程の評価について述べる。

### 2.2 加工フィーチャの認識

上野らが提案した、加工フィーチャ認識について述べる<sup>30)</sup>。上野らが提案した加工フィーチャの認識では、ワークの形状と部品の目標形状の差として抽出される除去領域を分割して、加工プリミティブを取得し、加工プリミティブに対する加工フィーチャを認識する。

#### 2.2.1 除去領域と境界面の延長

まず、図 2.1 に示すように、ワークの形状と部品の目標形状の差として、除去領域が抽出される。次に、図 2.2 に示すように、抽出した除去領域と部品の目標形状が接する面を境界面として取得し、取得した境界面のうち、除去領域内で延長できる境界面のみを、除去領域内で延長する。

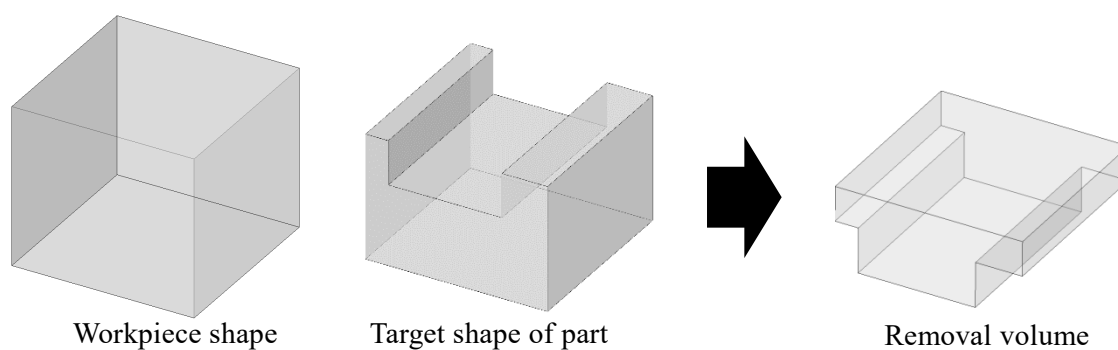


Fig 2.1 Extraction of removal volume

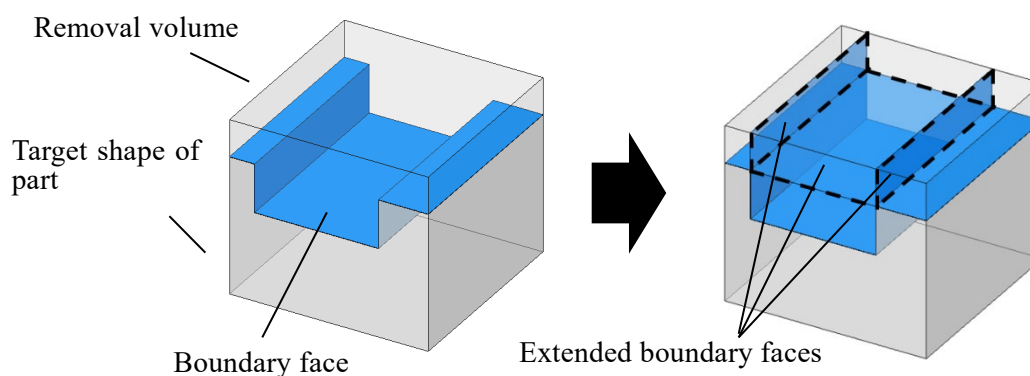


Fig.2.2 Extension of boundary faces

### 2.2.2 加工プリミティブの取得と分類

そして、図 2.3 に示すように、延長された境界面の辺を共有している延長された境界面をグループ化し、延長された境界面のグループと除去領域で囲まれる領域を、加工プリミティブとして取得する。

加工プリミティブの形状については、図 2.4(a)に示すように、外周形状が円である場合、円柱に分類し、図 2.4(b)に示すように、外周形状が円でない場合、直方体に分類する。さらに、図 2.5 に示すように、内周形状が円である面がある場合、穴のある円柱や直方体に分類する。これらの分類の結果、加工プリミティブは、図 2.6 に示すように、4 種類に分類される。取得した加工プリミティブと部品の目標形状が接する面を創成面として取得し、加工フィーチャの認識の際に用いられる。

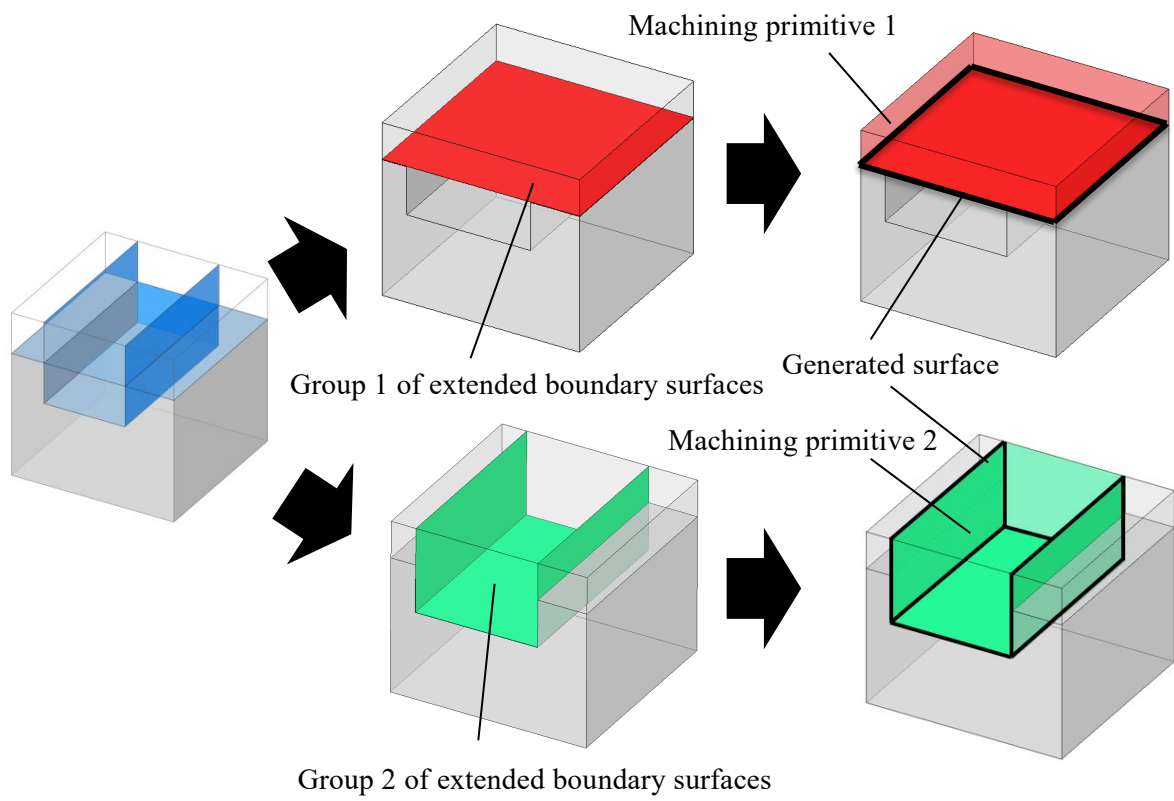


Fig.2.3 Acquired machining primitives

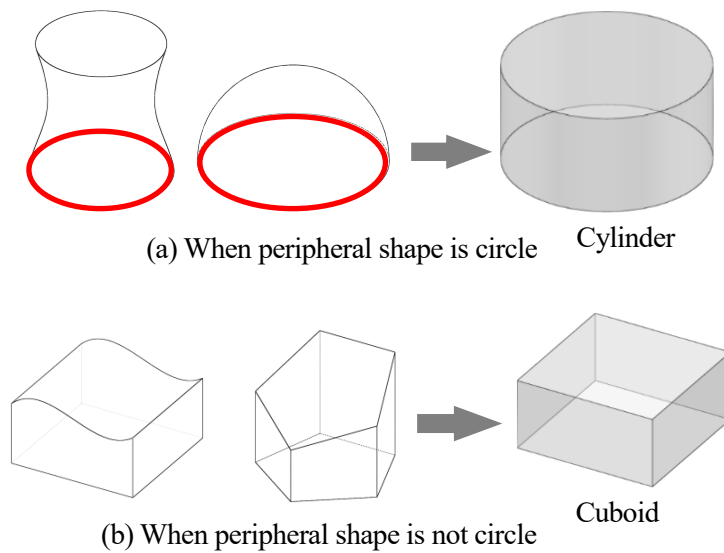


Fig.2.4 classification of machining primitives by peripheral shape



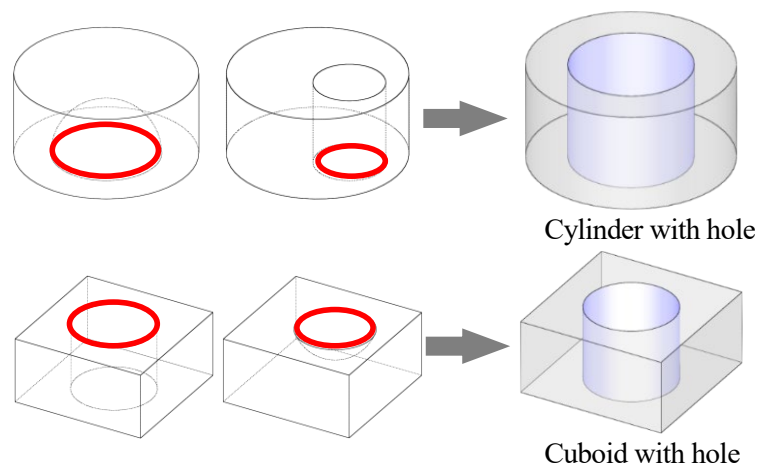


Fig.2.5 classification of machining primitive with hole

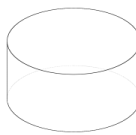
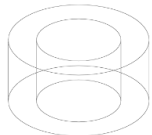
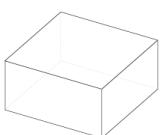
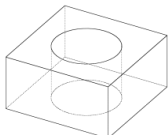
	Without hole	With hole
Cylinder	 Cylinder	 Cylinder with hole
Cuboid	 Cuboid	 Cuboid with hole

Fig.2.6 classification of machining primitives<sup>30)</sup>

### 2.2.3 加工フィーチャの認識

取得した加工プリミティブに対して、加工順序を割り当て、加工フィーチャを認識する。図 2.7(a)に加工プリミティブの体積が大きい順に加工順序を割り当てて加工フィーチャを認識した例、図 2.7(b)に創成面の数が少ない順に加工順序を割り当てて加工フィーチャを認識した例を示す。加工順序を加工プリミティブに割り当てた際、加工順序が割り当てられた加工プリミティブと領域が重なる他の加工プリミティブは、図 2.7(a)の加工フィーチャ2や加工フィーチャ3のように、加工順序が割り当てられた加工プリミティブと重なる領域を除去した領域から新たな加工プリミティブを取得し、創成面を更新することで、加工フィーチャを認識する。

このようにして認識された加工フィーチャは、加工プリミティブの種類、創成面の数、対面する創成面ペアの数、加工プリミティブに空いた穴が創成面であるかによって、表 2.1 に示すように、分類される。(A)から(D)が、加工プリミティブの形状が円柱の場合であり、これらと穴を示す(a)を組み合わせて加工フィーチャを認識する。(E)から(L)が、加工プリミティブの形状が直方体の場合であり、これらと穴を示す(b)を組み合わせて加工フィーチャを認識する。

Inoue らは、上野らが提案した、加工フィーチャ認識を用いて、ワークの形状と部品の目標形状を入力情報として、3次元CADソフトウェアで自動的に加工フィーチャを認識し、複数のパターンの加工フィーチャの出力を提案した<sup>4)</sup>。井上らは、さらに、部品の目標形状の中の面取り部、フィレット部や複雑形状部の加工フィーチャの認識も提案した<sup>3)</sup>。図 2.8 のように、面取り部やフィレット部は、面取り面やフィレット面を除去し、除去前後の部品の目標形状の差として抽出される領域を、面取り部やフィレット部の加工フィーチャとして認識する。複雑形状部は、円柱、直方体に近似して加工フィーチャを認識する。

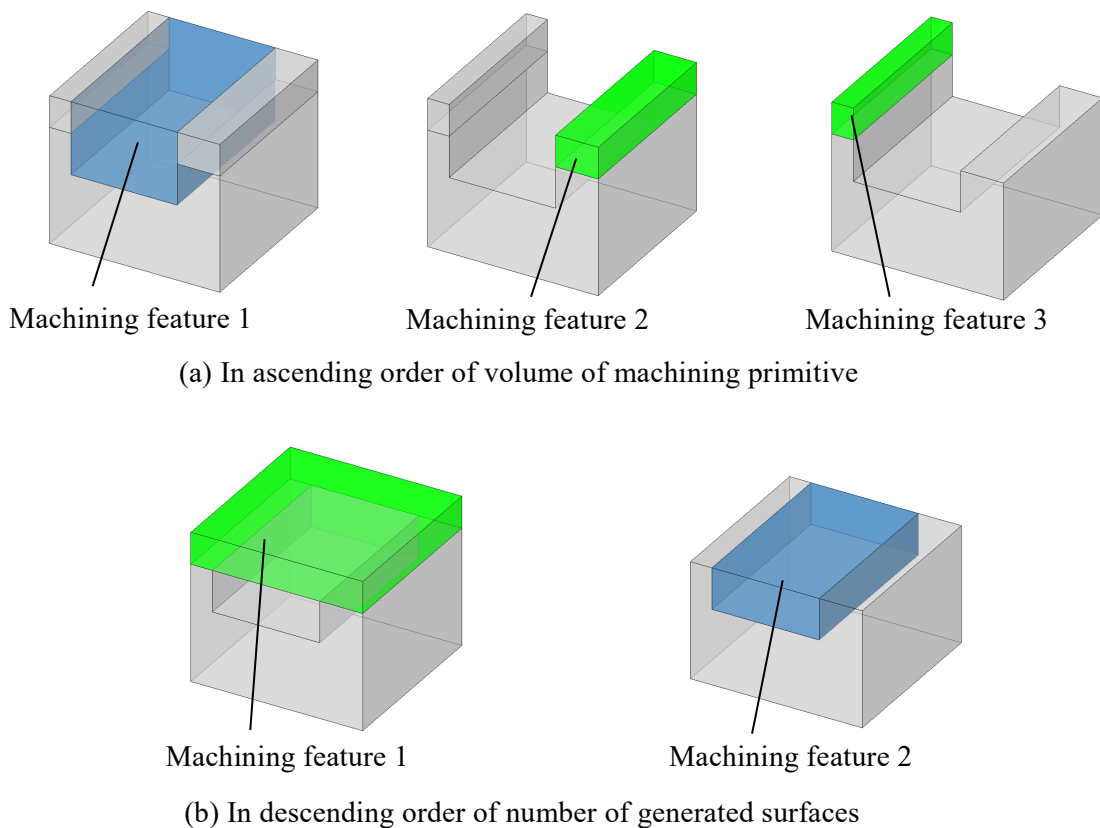
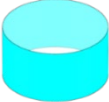
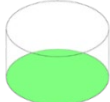

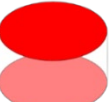
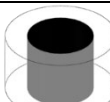
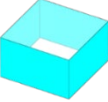
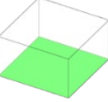




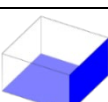
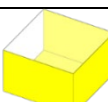
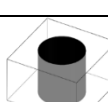


Fig.2.7 Example of machining feature recognition

Table 2.1 machining feature recognition types<sup>30)</sup>

(A) Through hole	(B) Face cylinder
 Number of generated surfaces: 1 Number of curved surfaces: 1	 Number of Generated surfaces: 1 Number of Curved surfaces: 0
(C) Blind hole	(D) Split face cylinder
 Number of Generated surfaces: 2 Number of Curved surfaces: 1	 Number of Generated surfaces: 2 Number of Curved surfaces: 0
	(a) Boss cylinder
	 Number of generated surfaces: 1 Number of holes: 1

(E) Through pocket	(F) Face prismatic
 Number of generated surfaces: 4 Number of pairs of opposite generated surfaces: 2	 Number of generated surfaces: 1 Number of pairs of opposite generated surfaces: 0
(G) Closed pocket	(H) Split face prismatic
 Number of generated surfaces: 5 Number of pairs of opposite generated surfaces: 2	 Number of generated surfaces: 2 Number of pairs of opposite generated surfaces: 1
(I) Open pocket	(J) Open slot
 Number of generated surfaces: 3 Number of pairs of opposite generated surfaces: 0	 Number of generated surfaces: 3 Number of pairs of opposite generated surfaces: 1
(K) Step	(L) Closed slot
 Number of generated surfaces: 2 Number of pairs of opposite generated surfaces: 0	 Number of generated surfaces: 4 Number of pairs of opposite generated surfaces: 1
	(b) Boss prismatic
	 Number of generated surfaces: 1 Number of holes: 1

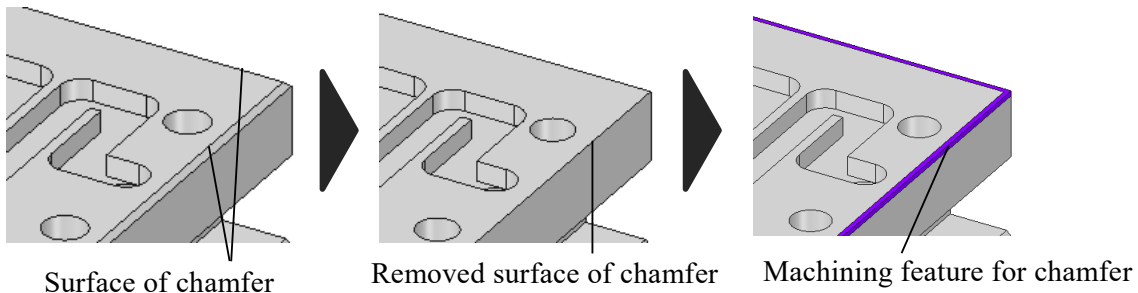


Fig.2.8 machining feature recognition for chamfer

### 2.3 荒加工用の加工フィーチャの認識

井上らが提案した、部品目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用した荒加工用の加工フィーチャ認識について述べる。

#### 2.3.1 製品製造情報が指示された加工プリミティブの結合

2.2 節で述べた上野らが提案した加工フィーチャ認識では、ワークの形状と部品の目標形状の差として抽出される除去領域と部品の目標形状が接する境界面を除去領域内で延長した境界面のグループと除去領域で囲まれる領域を加工プリミティブとして取得する。図 2.9(a)に示すように、ワークの形状と赤色の面に製品製造情報が指示された部品の目標形状を入力情報とすると、図 2.9(b)に示すように、製品製造情報が指示された赤色の面を含む領域を加工プリミティブ A や加工プリミティブ B と別々の加工プリミティブとして取得し、別々の加工工程とすると、加工工程間の加工誤差により製品製造情報を満たすことが困難になる場合がある。そこで、井上らは、図 2.9(c)に示すように、製品製造情報が指示された面を共有する加工プリミティブを結合し、一つの加工工程とすることで、加工工程間の加工誤差を無くし、製品製造情報を満たす加工プリミティブを取得する、荒加工用の加工フィーチャ認識を提案した。

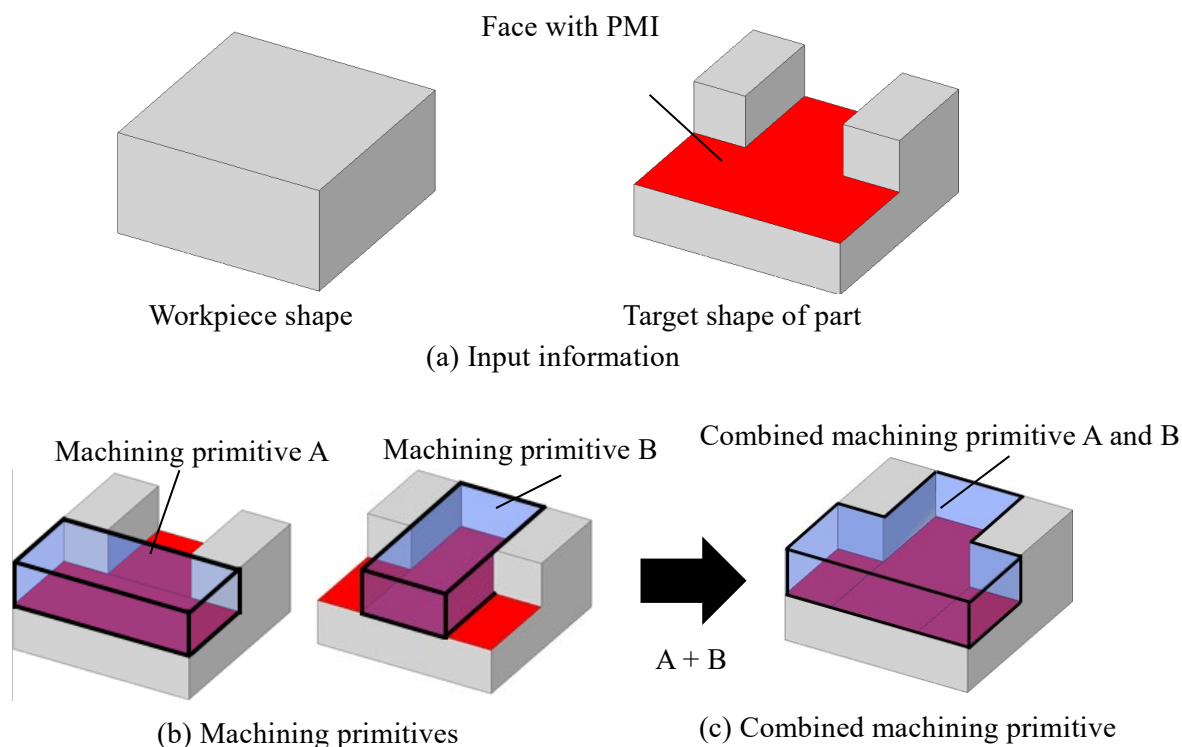


Fig.2.9 Combined machining primitives that are share same face with PMI

### 2.3.2 複数加工プリミティブを包括する加工フィーチャの認識

加工フィーチャは、取得した加工プリミティブに対して、加工順序を割り当て、加工プリミティブの種類、創成面の数、対面する創成面ペアの数、加工プリミティブに空いた穴が創成面であるかによって分類し、認識される。その際、一つの加工プリミティブに対して、一つの加工工程しか存在しないことを想定し、加工フィーチャが認識される。しかしながら、図 2.10(a)に示すように、同じ製品製造情報が指示された面を含む複数の加工プリミティブを、製品製造情報を利用せずに加工フィーチャを認識すると、図 2.10(b)に示すように、Step や Face prismatic といった複数の加工フィーチャとして認識し、別々の加工工程とすると、加工工程間の加工誤差により製品製造情報を満たすことが困難になる場合がある。そこで、井上らは、図 2.10(c)に示すように、製品製造情報を利用して、同じ製品製造情報が指示された面を含む複数の加工プリミティブに同じ加工順序を割り当て、それらの加工プリミティブを包括する一つの Step といった加工フィーチャとして認識し、一つの加工工程とすることで、加工工程間の加工誤差を無くし、製品製造情報を満たすことを狙った荒加工用の加工フィーチャの認識を提案した。

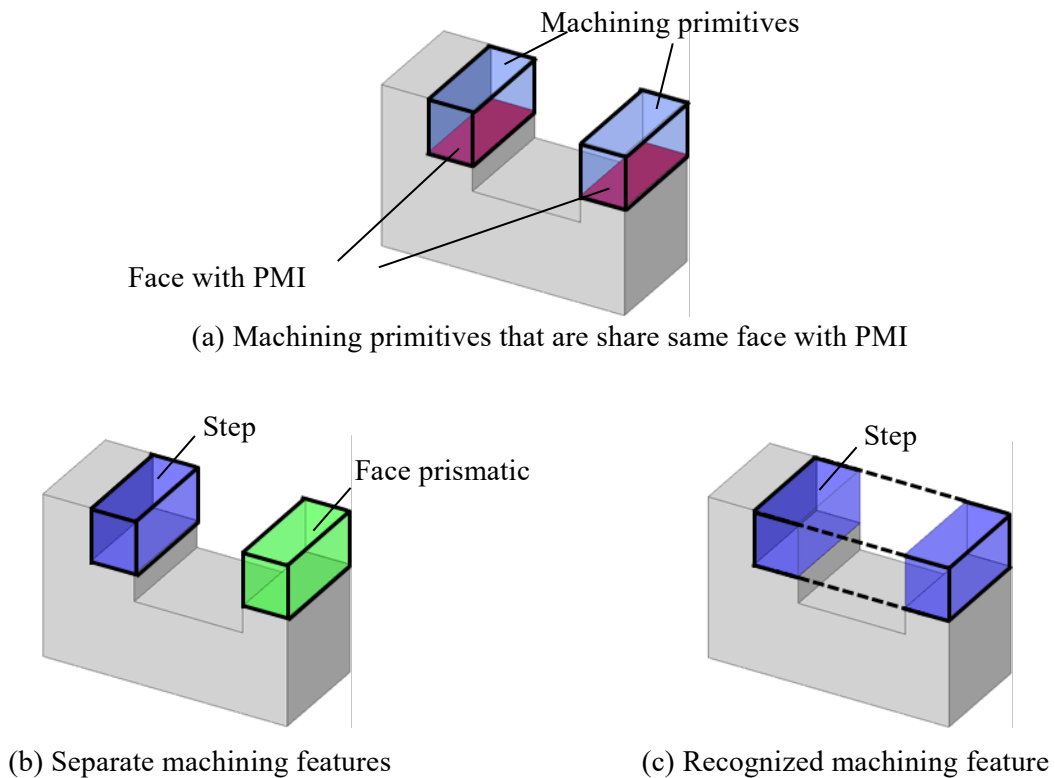


Fig.2.10 machining feature recognition from separated machining primitives that are allocated same machining sequence

## 2.4 加工工程の評価

惟村らが提案した、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程から所望の加工工程を選択するための加工工程の評価について述べる。認識される加工フィーチャは、認識の自由度が高い一方、複数のパターンとなるため、候補となる加工箇所や加工順序の組合せは膨大となり、膨大な組み合わせから、所望の加工箇所や加工順序の選択が必要となる。そこで、惟村らは、加工精度、環境負荷や加工時間を指標として、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程から所望の加工工程を選択するための加工工程の評価を提案した<sup>33)</sup>。

加工精度については、図 2.11 に示すように、加工中のワークを円柱の片持ち梁への集中荷重と仮定し、式(2.1)や式(2.2)から求める変形量で評価する。ここで、 $A$  [ $\text{mm}^2$ ]は工具が加工プリミティブを通過する最大断面積、 $K_{rc}$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]は工作物の材質に応じた切削係数、 $W$  [ $\text{N}$ ]は荷重、 $L$  [ $\text{mm}$ ]ははりの長さ、 $E$  [ $\text{GPa}$ ]は縦弾性係数、 $I$  [ $\text{mm}^4$ ]は断面二次モーメント、 $\delta$  [ $\text{mm}$ ]はたわみ量である。

$$W = A \times K_{rc} \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{1}{3} \cdot \frac{WL^3}{EI} \quad (2.2)$$

環境負荷については、式(2.3)や式(2.4)から求める消費電力で評価する。ここで、 $K_L$  [N・min]は係数、 $F_L$  [mm/min]は送り速度、 $T_L$  [N・m]はサーボモータのトルク、 $n$  [rpm]はサーボモータの回転数、 $t$  [hour]は時間、 $P$  [kWh]はサーボモータの消費電力である。

$$T_L = K_L \times F_L \quad (2.3)$$

$$P = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n \times T_L \times t}{1000} \quad (2.4)$$

加工時間については、第5章で述べる。

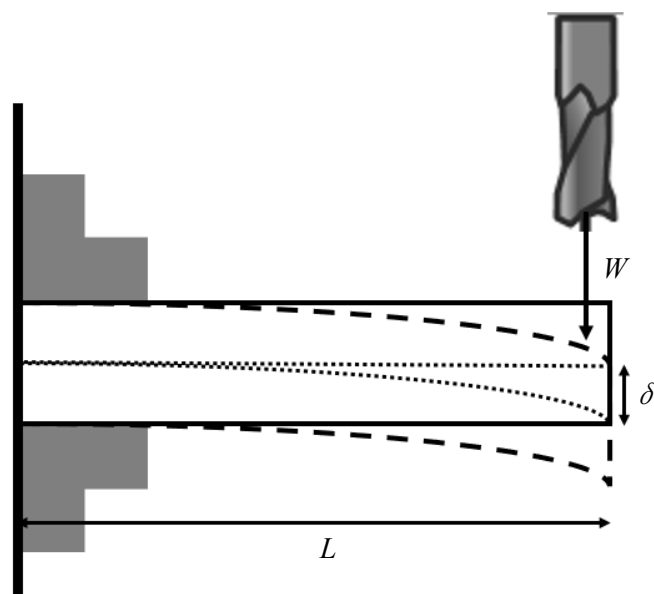


Fig.2.11 deflection of workpiece

## 2.5 おわりに

本章では、上野らが提案した、加工フィーチャ認識、井上らが提案した、部品目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用した荒加工用の加工フィーチャ認識、惟村らが提案した、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程から所望の加工工程を選択するための加工工程の評価について述べた。第3章では、製品製造情報を反映できる仕上げ加工に向けた新たな加工フィーチャの導入について述べる。これまでに提案されている加工フィーチャ

は、荒加工のみを対象としており、取り扱える製品製造情報も表面粗さに限定されていた。また、製品製造情報が加工フィーチャに紐づいていないため、作業設計時に製品製造情報を参照できなかった。そこで、仕上げ加工を対象とした新たな加工フィーチャを導入する。また、受け渡された製品製造情報を参照することで、仕上げ加工を含む一連の加工工程を対象に作業設計を施す方法を考案し、ケーススタディを実施して、その有用性を検証している。第4章では、工程設計の自動化に向けて、上記の製品製造情報が紐づいた加工フィーチャを利用した作業情報の推定方法について説明する。切削条件や使用工具などの作業情報は、作業者の技能に強く依存して決定されており、標準化が進んでいない。また、決定した作業情報のCAMソフトウェアへの入力を作業者に委ねており、時間的負担を強いている。そこで、認識された加工フィーチャを用いて、事例ベース推論により作業情報を推定し、CAMソフトウェアを用いてNCプログラムを自動的に生成する。実施したケーススタディにより、仕上げ加工の有無に応じて異なる作業情報を推定できることを確認している。第5章では、認識された加工フィーチャを利用した機械学習による加工時間の推定方法を説明する。加工工程の評価指標の一つである加工時間を、CAMソフトウェアで生成されるNCプログラムから計算するには、加工工程の候補が膨大なため、相当の時間が不可欠になる。結果として、加工フィーチャの認識により算出される加工工程案の選択に時間を要する。そこで、認識された加工フィーチャを利用して、機械学習により高速に加工時間を推定する方法を考案し、ケーススタディにより、高速に高い精度で加工時間を推定できることを確認している。





## 第3章

# 製品製造情報を反映した 加工フィーチャの認識

### 3.1 はじめに

第2章では、上野らが提案した、加工フィーチャ認識、井上らが提案した、部品の目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用した荒加工用の加工フィーチャ認識について述べた。しかしながら、井上らの提案では、対象とする製品製造情報が、部品の目標形状の面に指示される表面粗さに限定されており、例えば、辺に指示される寸法公差には対応していない。また、対象とする加工フィーチャが、荒加工に限定されており、表面粗さなどの製品製造情報を満たすことが困難になる場合がある。さらに、製品製造情報が認識された加工フィーチャに受け渡されておらず、作業設計時に加工フィーチャから製品製造情報を参照することができないため、表面粗さなどの製品製造情報を満たす切削条件等を検討することが困難になる場合がある。そこで、本章では、これらの問題点を解決する、製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識について述べる。

### 3.2 荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識の流れ

図 3.1 に本研究で提案する製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識の流れを示す。図 3.1 の太枠で囲まれている部分が、本研究で追加や変更した処理を示す。提案する製品製造情報を反映した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識では、製品製造情報を満たすために、ワークの形状と製品製造情報が指示された部品の目標形状の差として抽出される除去領域の面のうち、製品製造情報を利用する際に参照する面（以下、参照面）を製品製造情報から決定する。次に、ワークの形状と部品の目標形状の差として抽出される除去領域を分割して、加工プリミティブを取得し、加工順序を割り当てることで、製品製造情報を参照しながら加工プリミティブに対する加工フィーチャを認識する。さらに、必要に応じて、認識した加工フィーチャを移動し、加工フィーチャのリストを出力する。本研究では、アイコクアルファ株式会社製の3次元CADソフト

ウェア Simple Modeler の API 機能を利用する。

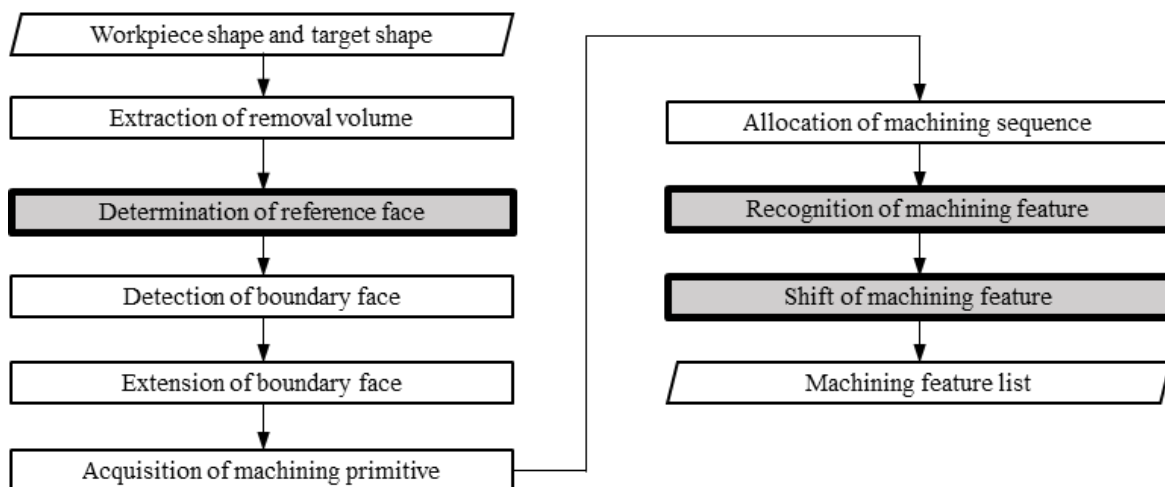
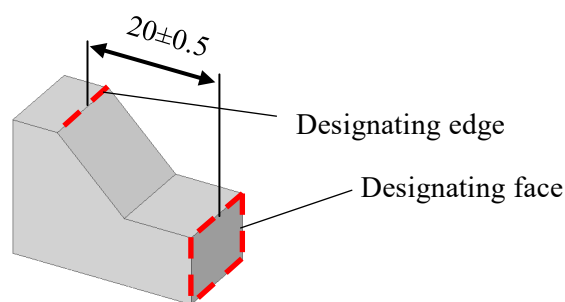


Fig 3.1 Flow of recognition of machining features using PMI

### 3.3 3次元 CAD モデルへの製品製造情報の付加

近年、製品の製造に必要な情報を3次元 CAD モデルにまとめる取り組みとして、製品製造情報を注釈として3次元 CAD モデルに付加するモデルベース定義が様々な業界で普及し始めている<sup>4)</sup>。しかしながら、製品製造情報を3次元 CAD ソフトウェアから CAM ソフトウェアなどの後工程のソフトウェアに受け渡すツールは発展途上であり、ソフトウェア間の受け渡しにおいて、多くの課題が存在している<sup>42)</sup>。そこで、本研究で提案する製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識では、製品製造情報のシステム間の受け渡しを、テキストファイル形式で簡易的に行う。始めに、製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識で扱う製品製造情報が指示された部品の3次元 CAD モデルのすべての辺や面に番号を割り当てる。番号は、辺や面の中心点の Z 座標が大きい順に、Z 座標が同じ場合は X 座標が大きい順、Z 座標も X 座標も同じ場合は Y 座標が大きい順に割り当てる。そして、製品製造情報が指示されている辺や面の番号と製品製造情報をテキストファイルに記述することで、製品製造情報をシステム間で受け渡すことができる。図 3.2 に製品製造情報付加の一例を示す。部品に図 3.2(a)に示すように寸法公差が指示された場合、製品製造情報が指示されている辺や面の番号と製品製造情報が図 3.2(b)に示すようにテキストファイルに記述される。このテキストファイルは、第4章で述べる製品製造情報を反映した作業情報の推定に用いられる。



(a) Designating dimensional tolerance

Element1	Element2	Type	Value	+	-
Face_007	Edge_001	Distance	25	0.5	0.5;

(b) Text file including PMI

Fig.3.2 Example of PMI setting

### 3.4 仕上げ加工用の加工フィーチャの導入

井上らが提案した、部品の目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を反映した荒加工用の加工フィーチャ認識<sup>31)</sup>では、対象とする加工フィーチャが、荒加工に限定されており、図 3.3 に示すように、一つの加工フィーチャに荒加工と仕上げ加工が連続する加工順序が割り当てられていた。しかしながら、荒加工と仕上げ加工を交互に繰り返す加工は、工具交換回数増加による加工時間増加や、製品製造情報を満たすことが困難になる場合がある。そこで、本研究では、従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャを新たに導入する。図 3.4 に、従来の荒加工用の加工フィーチャと新たに導入する仕上げ加工用の加工フィーチャの比較を示す。図 3.4(a)の従来の荒加工用の加工フィーチャは、荒加工が行われる除去領域を分割した加工プリミティブ、割り当てられた荒加工の加工順序を有する一方、図 3.4(b)の新たに導入する仕上げ加工用の加工フィーチャは、仕上げ加工が行われる製品製造情報が指示された面を有する加工プリミティブ、仕上げ加工の加工フィーチャを有する。

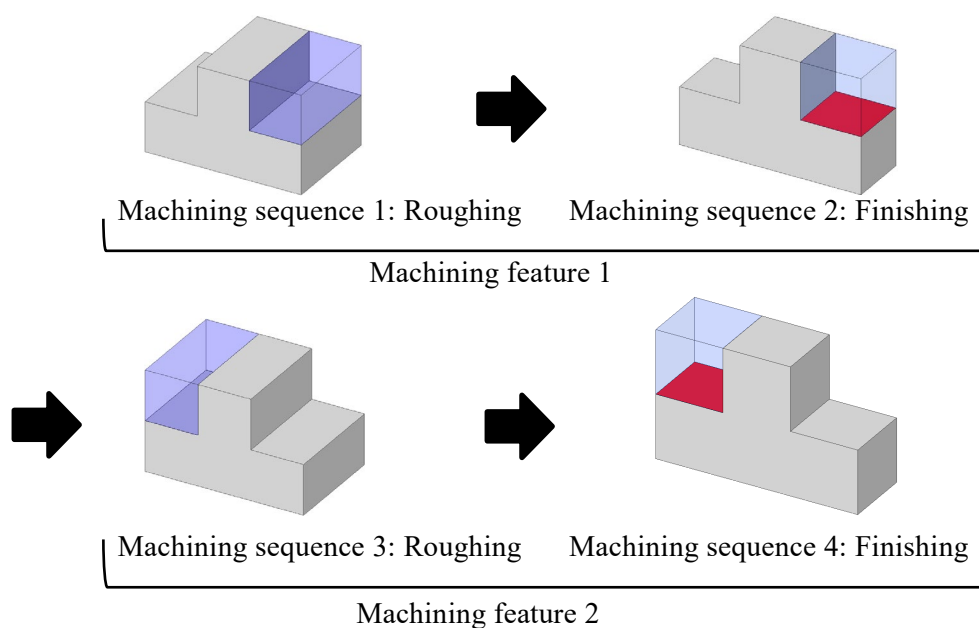


Fig.3.3 Machining sequence for roughing and finishing in conventional method <sup>31)</sup>

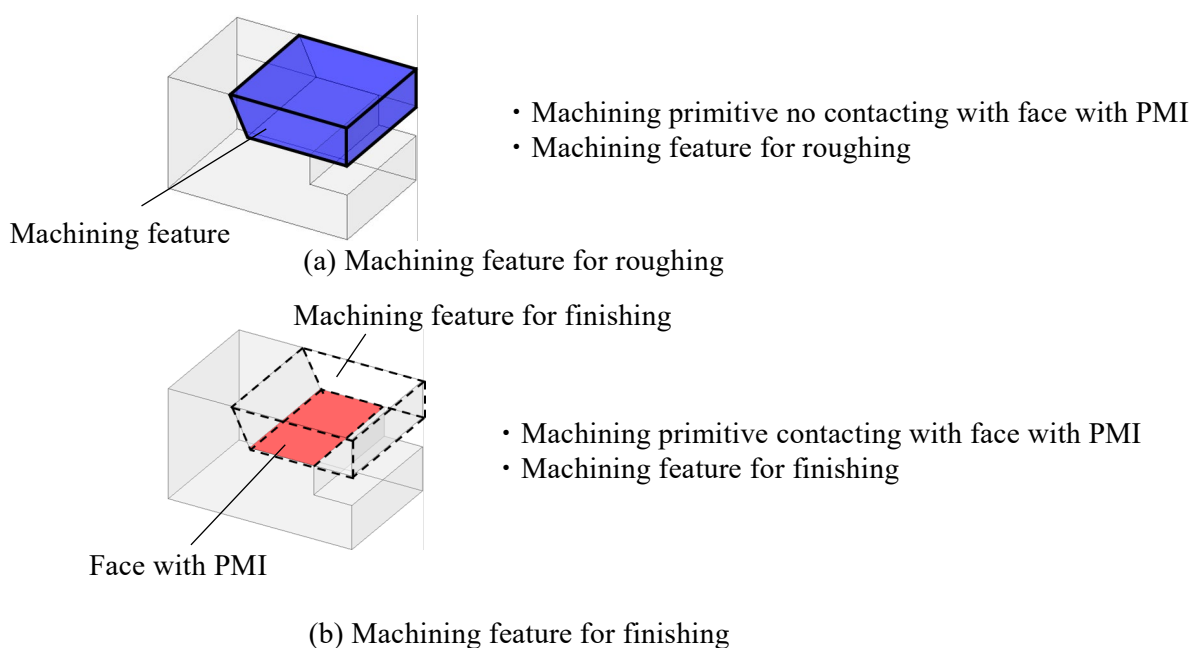


Fig.3.4 Comparison between conventional machining feature for roughing and newly introduced machining feature for finishing

### 3.5 指示された製品製造情報からの参照面の決定

製品製造情報には、表面粗さや平面度などの面に指示されるものや、寸法公差などの辺に指示されるものがあり、製品製造情報が多様であることから、そのままでは、製品製造情報を一様に扱うことができない。そこで、本研究では、製品製造情報を満たすた

めに、ワークの形状と製品製造情報が指示された部品目標形状の差として抽出される除去領域の面のうち、製品製造情報を利用する際に参照する面を（以下、参照面）を製品製造情報から決定し、製品製造情報を除去領域の参照面に受け渡すことで、寸法公差や幾何公差の種類を問わず、除去領域の面に付加される製品製造情報として一様に扱えるようにする。製品製造情報を一様に参照できるように、多様な製品製造情報に応じて参照面を決定する。図 3.5 に示すように、平面度などの幾何公差、面と面の距離などの寸法公差といった製品製造情報が、面に指示されている場合、製品や製造情報が指示されている面（以下指示面）に接する除去領域の面を参照面とする。一方、寸法公差といった製品製造情報が辺に指示されている場合、寸法公差が指示されている面（以下、指示面）と、寸法公差が指示されている辺（以下、指示辺）の関係から参照面を決定する。図 3.6(a) に示すように、指示面と指示辺により寸法公差が指示されている場合、指示辺を有する面と指示面に接する面のうち、部品目標形状に接する除去領域の面を参照面とする。また、図 3.6(b) に示すように、二つの指示辺により寸法公差が指示されている場合、指示辺を有する面のうち、二つの指示辺が作る面に平行でなく、かつ、部品目標形状に接する除去領域の面を参照面とする。さらに、図 3.6(c) に示すように、一つの指示辺により寸法公差が指示されている場合、指示辺の頂点を有する面のうち、指示辺に平行でなく、かつ、部品目標形状に接する除去領域の面を参照面とする。

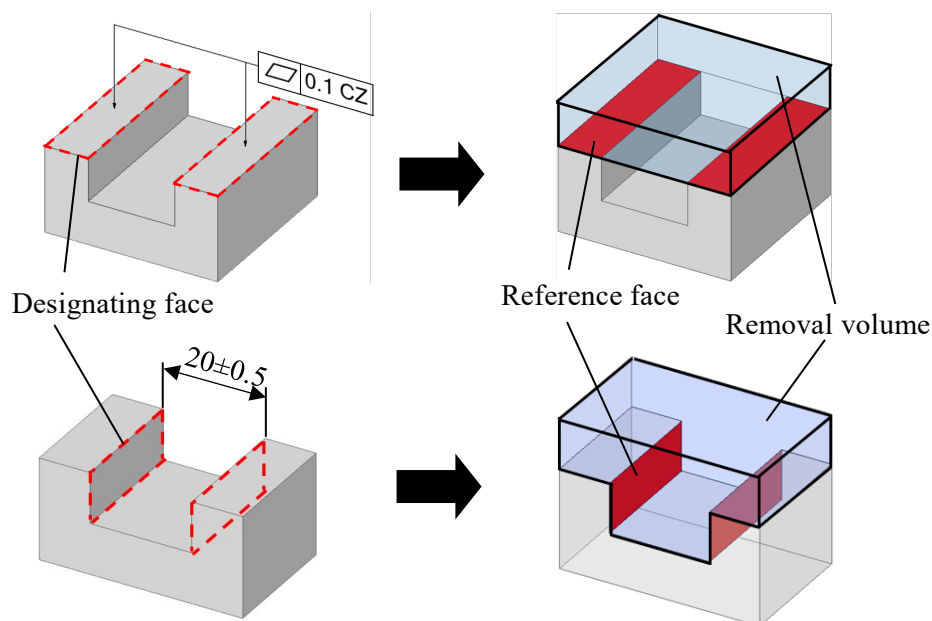
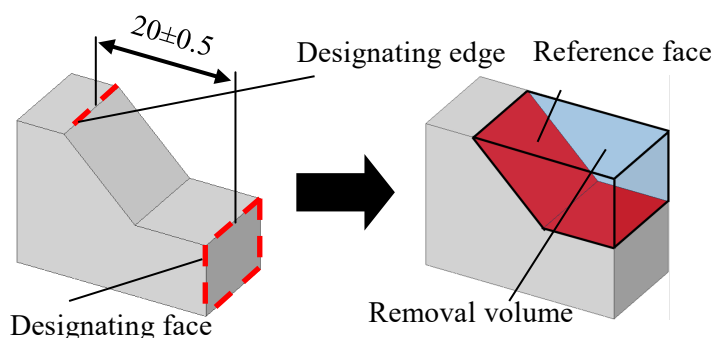
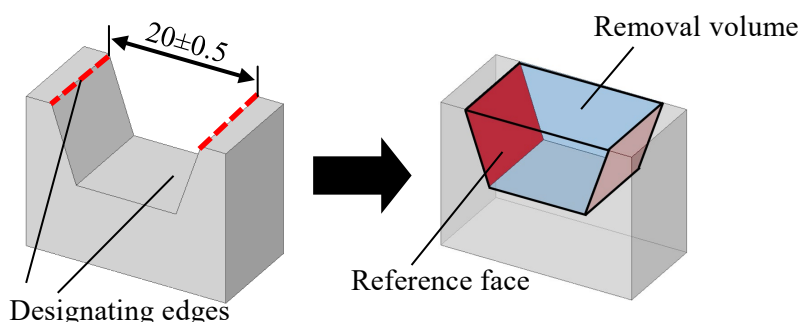


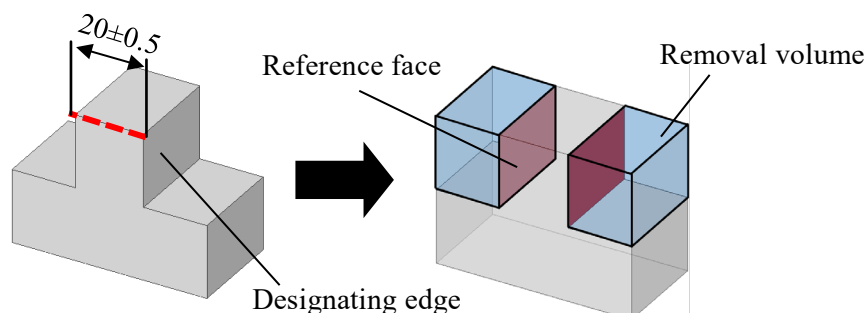
Fig.3.5 Example of reference face when PMI is designated for face



(a) Example of reference face when PMI is designated for face and edge



(b) Example of reference face when PMI is designated for two edges



(c) Example of reference face when PMI is designated for edge

Fig.3.6 Example of reference face when PMI is designated for edge

### 3.6 荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識

参照面の決定後、除去領域を分割して、加工プリミティブを取得する。この際、除去領域の参照面と製品製造情報は、加工プリミティブへと受け渡される。次に、加工順序を割り当てることで、加工プリミティブに対する加工フィーチャを認識する。図 3.7 に示すように、製品製造情報が指示された面を有する加工プリミティブがある場合、複製した加工プリミティブから仕上げ加工用の加工フィーチャを認識する。これにより、荒加工の後に、仕上げ加工されるように、製品製造情報を満たす加工フィーチャを認識する。また、図 3.8 に示すように、複数の加工プリミティブに、同じ製品製造情報が受け渡されている場合、それらの複数の加工プリミティブを結合することで、一つの仕上げ

加工用の加工フィーチャを認識する。これにより、別々の加工工程での荒加工後に、一つの加工工程で仕上げ加工されることで、加工工程間の加工誤差を無くし、製品製造情報を満たす加工フィーチャを認識する。

また、部品の目標形状に寸法公差が指示されている場合、寸法公差を満たすために、その寸法公差の中央値を目標に加工することがある。その場合、部品の目標形状と実際に加工する形状がずれるため、CAMソフトウェアでNCプログラムを生成する前に、図3.9に示すように、3次元CADソフトウェアで部品の目標形状を手作業で変更する必要がある。そこで、加工フィーチャに寸法公差が受け渡されている場合、寸法公差の中央値に加工フィーチャを自動的に変更する。自動的に変更された加工フィーチャを用いて、CAMソフトウェアでNCプログラムを生成することで、3次元CADソフトウェアで部品の目標形状を手作業で変更しなくても、製品製造情報を満たす加工ができる。

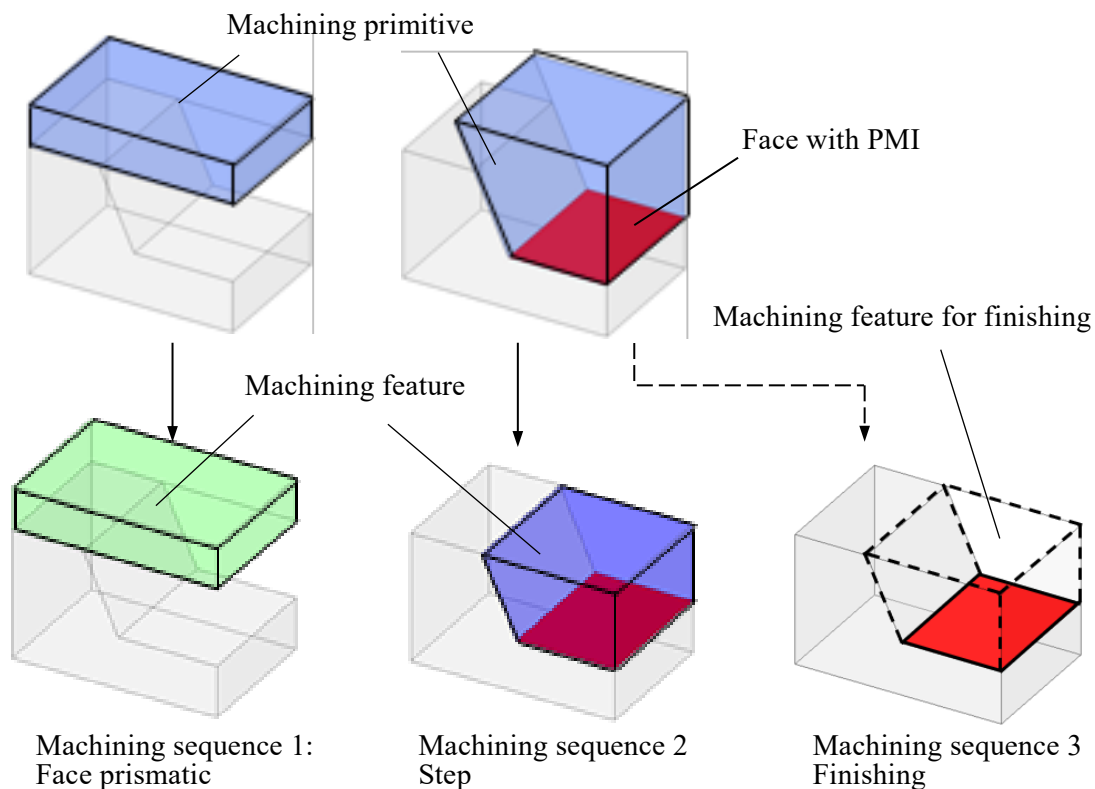


Fig.3.7 Machining feature recognition



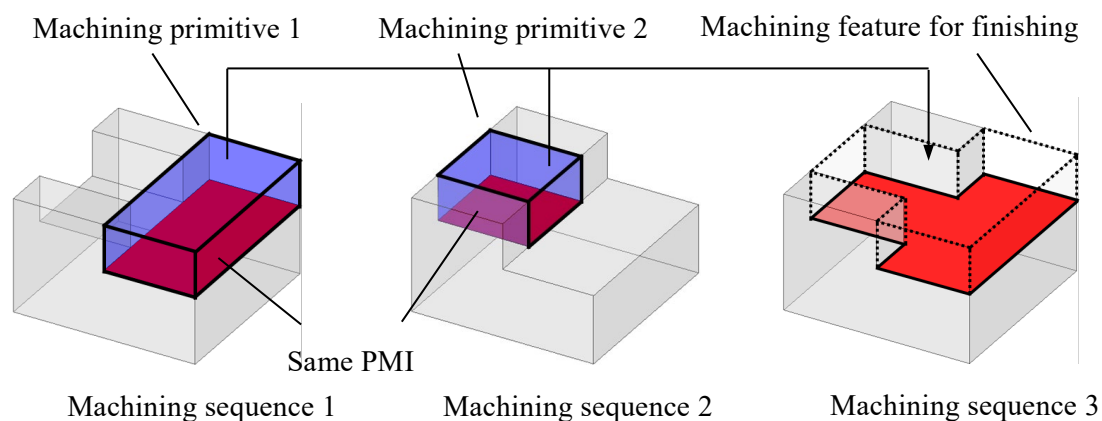


Fig.3.8 machining feature recognition for finishing by combining machining primitives

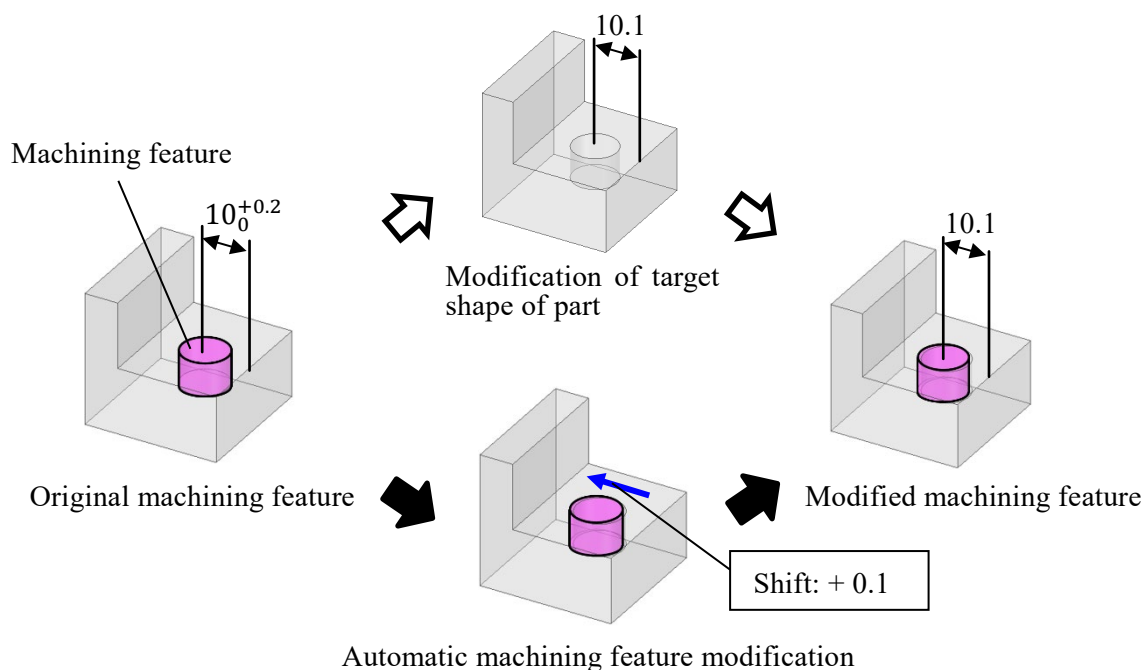


Fig.3.9 Automatic machining feature modification

### 3.7 ケーススタディ

三つのパターン A, B, C を想定したケーススタディにより, 提案した製品製造情報を反映した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識により, 製品製造情報を反映した仕上げ加工を含む工程設計支援を行う, 製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識の有効性を検証した結果について述べる. 図 3.10 にワークの形状と製品製造情報が指示された部品の目標形状を示す. また, 図 3.11 にワークの形状と製品製造情報が指示された部品の目標形状の差として抽出される除去領域と参照面を示す. パターン A で

は、従来の荒加工用の加工フィーチャのみを認識し、仕上げ加工用の加工フィーチャを認識しない。パターン B では、従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャも認識する。パターン C では、パターン B と同じように、従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャも認識する。加えて、同じ製品製造情報が受け渡されている加工プリミティブを結合することで、一つの仕上げ加工用の加工フィーチャを認識する。いずれのパターンも、荒加工、仕上げ加工の順に加工順序を割り当て、荒加工は、体積の大きい順に加工順序を割り当て、仕上げ加工は、寸法公差が受け渡された加工フィーチャを優先し、同じ種類の製品製造情報が受け渡された加工フィーチャでは、体積の大きい順に加工順序を割り当てる。パターン A の加工フィーチャの認識結果を表 3.1 に示す。パターン B の加工フィーチャの認識結果を表 3.2 に示す。パターン C の加工フィーチャの認識結果を表 3.3 に示す。

表 3.1 のパターン A の加工フィーチャの認識結果を見ると、従来の荒加工用の加工フィーチャのみが認識されており、仕上げ加工用の加工フィーチャが認識されていないことがわかる。表 3.2 のパターン B の加工フィーチャの認識結果を見ると、加工順序 1 から 11 は、パターン A の加工フィーチャと同じ形状の従来の荒加工用の加工フィーチャが認識されているうえに、製品製造情報が受け渡されていることがわかる。また、加工順序 12 から 21 は、仕上げ加工用の加工フィーチャが認識されていることがわかる。表 3.3 のパターン C の加工フィーチャの認識結果を見ると、加工順序 1 から 11 は、パターン A の加工フィーチャと同じ形状の従来の荒加工用の加工フィーチャが認識されているうえに、製品製造情報が受け渡されていることがわかる。また、加工順序 12 から 16 は、仕上げ用の加工フィーチャが認識されていることがわかる。加えて、加工順序 14 や加工順序 15 のように、同じ製品情報が受け渡されている加工プリミティブが結合されることで、一つの仕上げ加工用の加工フィーチャが認識されていることがわかる。以上のことから、提案した製品製造情報を反映した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識により、製品製造情報を反映した仕上げ加工を含む工程設計支援を行えることを確認し、製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識の有効性を検証した。

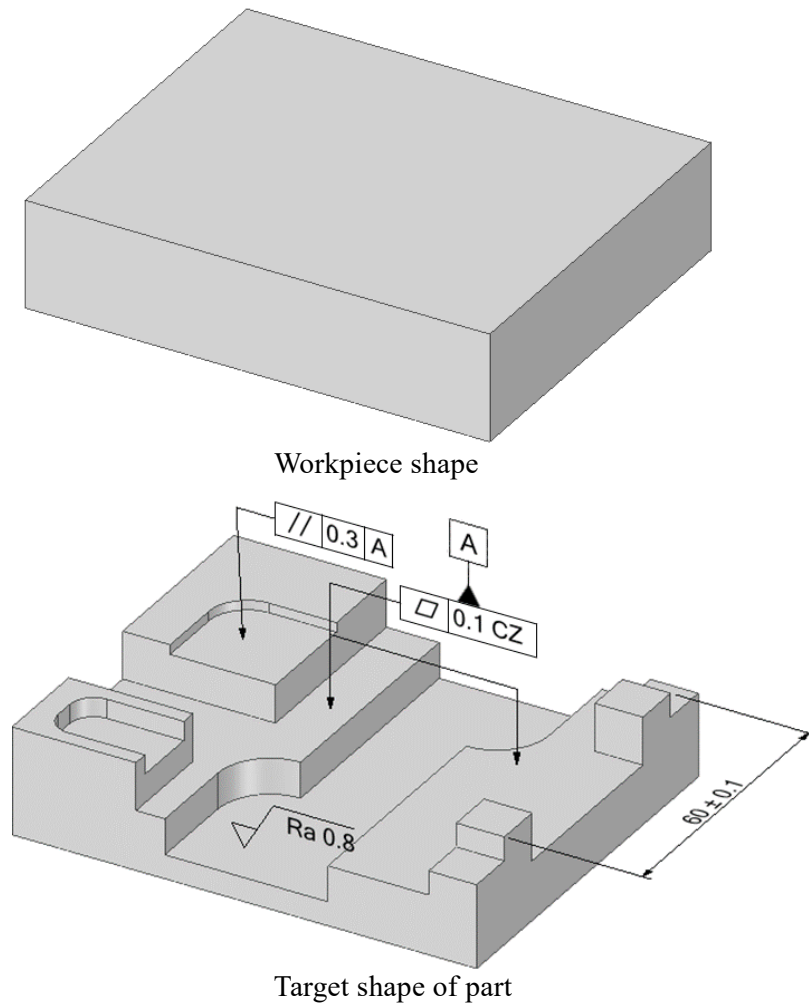


Fig.3.10 Workpiece shape and target shape of part for case study

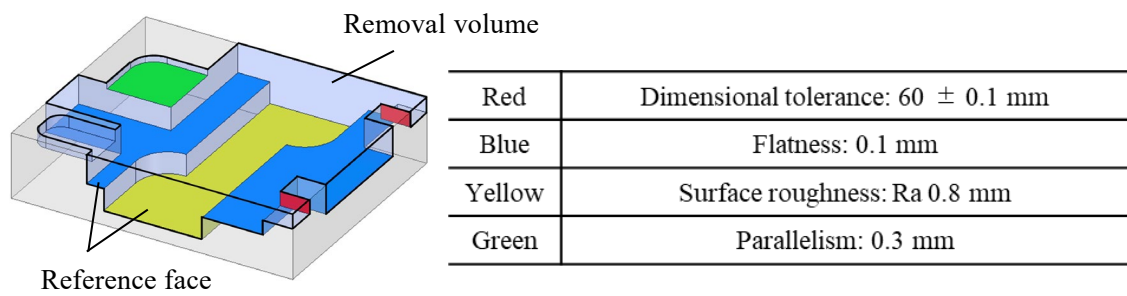


Fig.3.11 Removal volume and reference face

Table 3.1 result of machining feature recognition in pattern A

1	Roughing	7	Roughing
	Open slot		Closed slot
2	Roughing	8	Roughing
	Open slot		Open pocket
3	Roughing	9	Roughing
	Open slot		Step
4	Roughing	10	Roughing
	Open slot		Step
5	Roughing	11	Roughing
	Open pocket		Step
6	Roughing		
	Open pocket		

Table 3.2 result of machining feature recognition in pattern B (continue)

1	Roughing	9	Roughing
	<p>Open slot Flatness 0.1</p>		<p>Flatness 0.1 Step</p>
2	Roughing	10	Roughing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open slot</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math> Step</p>
3	Roughing	11	Roughing
	<p>Open slot Flatness 0.1</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math> Step</p>
4	Roughing	12	Finishing
	<p>Flatness 0.1 Open slot</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math></p>
5	Roughing	13	Finishing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open pocket</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math></p>
6	Roughing	14	Finishing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open pocket</p>		<p>Flatness 0.1</p>
7	Roughing	15	Finishing
	<p>Closed slot</p>		<p>Surface roughness Ra 0.8</p>
8	Roughing	16	Finishing
	<p>Parallelism 0.3 Open pocket</p>		<p>Flatness 0.1</p>

Table 3.2 result of machining feature recognition in pattern B

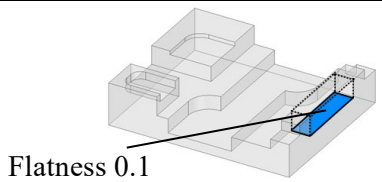
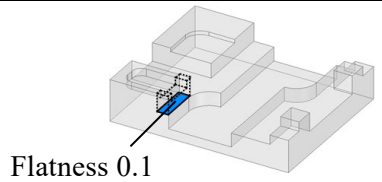
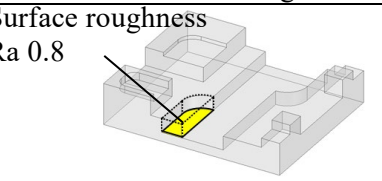
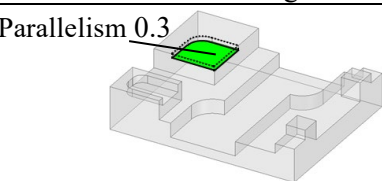
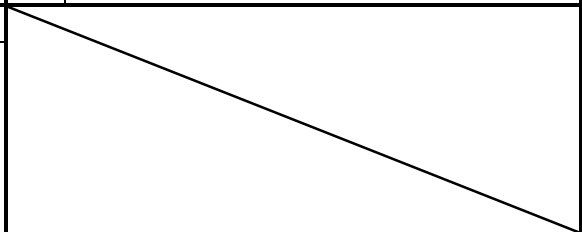
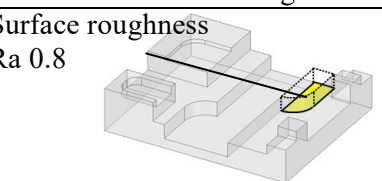
17	Finishing	20	Finishing
	 <p>Flatness 0.1</p>		 <p>Flatness 0.1</p>
18	Finishing	21	Finishing
	 <p>Surface roughness Ra 0.8</p>		 <p>Parallelism 0.3</p>
19	Finishing		
	 <p>Surface roughness Ra 0.8</p>		

Table 3.3 result of machining feature recognition in pattern C

1	Roughing	9	Roughing
	<p>Open slot Flatness 0.1</p>		<p>Flatness 0.1 Step</p>
2	Roughing	10	Roughing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open slot</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math> Step</p>
3	Roughing	11	Roughing
	<p>Open slot Flatness 0.1</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math> Step</p>
4	Roughing	12	Finishing
	<p>Flatness 0.1 Open slot</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math></p>
5	Roughing	13	Finishing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open pocket</p>		<p>Dimensional tolerance <math>60 \pm 0.1</math></p>
6	Roughing	14	Finishing
	<p>Surface roughness Ra 0.8 Open pocket</p>		<p>Flatness 0.1</p>
7	Roughing	15	Finishing
	<p>Closed slot</p>		<p>Surface roughness Ra 0.8</p>
8	Roughing	16	Finishing
	<p>Parallelism 0.3 Open pocket</p>		<p>Parallelism 0.3</p>

### 3.8 おわりに

本章では、本研究で提案する製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識について述べた。この提案では、従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャを新たに導入した。また、部品の目標形状に指示された製品製造情報を除去領域の参照面や加工プリミティブに受け渡すことで、製品製造情報を一様に扱えるようにし、加工プリミティブの製品製造情報を参照して、荒加工用の加工フィーチャや仕上げ加工用の加工フィーチャの認識を可能とした。そして、提案した製品製造情報を反映した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識により、製品製造情報を反映した仕上げ加工を含む工程設計支援を行えること、認識した加工フィーチャを用いて、加工箇所や加工順序が自動的に提案されることを、ケーススタディの結果から確認し、製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識の有効性を検証した。第4章では、工程設計の自動化に向けて、上記の製品製造情報が紐づいた加工フィーチャを利用した作業情報の推定方法について説明する。切削条件や使用工具などの作業情報は、作業者の技能に強く依存して決定されており、標準化が進んでいない。また、決定した作業情報のCAMソフトウェアへの入力を作業者に委ねており、時間的負担を強いている。そこで、認識された加工フィーチャを用いて、事例ベース推論により作業情報を推定し、CAMソフトウェアを用いてNCプログラムを自動的に生成する。実施したケーススタディにより、仕上げ加工の有無に応じて異なる作業情報を推定できることを確認している。





# 第4章

## 加工フィーチャを用いた 事例ベース推論による 作業情報の推定

---

---

### 4.1 はじめに

第2章では、上野らが提案した、加工フィーチャ認識、井上らが提案した、部品目標形状の面に指示された幾何公差などの製品製造情報を利用した加工フィーチャ認識について述べた。しかしながら、井上らの提案では、加工対象の加工フィーチャが、荒加工に限定されており、また、製品製造情報が認識された加工フィーチャに受け渡されていない。そこで、第3章では、従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャを新たに導入し、部品の目標形状に指示された製品製造情報を除去領域の参照面や加工プリミティブに受け渡すことで、製品製造情報を一様に扱えるようにし、加工プリミティブの製品製造情報を参照して、荒加工用の加工フィーチャや仕上げ加工用の加工フィーチャの認識を可能とする、製品製造情報を反映した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識について述べた。これらにより認識された加工フィーチャを加工対象の加工フィーチャとし、本章では、工程設計支援のための使用工具や切削条件といった作業情報の自動的な推定、加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を反映した作業情報の自動的な推定、推定した作業情報のCAMソフトウェアへの自動入力、CAMソフトウェアでのNCプログラムの自動生成について述べる。

### 4.2 工具情報と工具情報データベース

本研究で用いる工具情報を図4.1に示す。工具情報には、工具名、工具の種類、工具径、刃数、刃長、工具長、ホルダ寸法、工具の材料やコーティング有無が含まれる。工具情報は、CAMソフトウェアのファイル形式で、工具情報データベースとして一つのフォルダに保存されている。

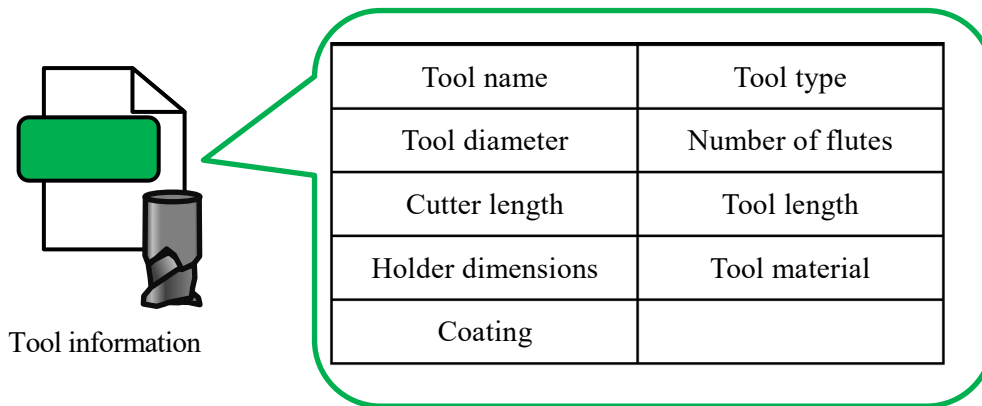


Fig.4.1 Tool information

### 4.3 作業情報と作業情報データベース

本研究で用いる作業情報を図 4.2 に示す。作業情報には、CAM ソフトウェアで NC プログラムを生成する際に必要となる、加工方法、使用工具の他に、主軸回転数、送り速度、工具軸方向切り込み深さや工具径方向切り込み深さといった切削条件、加工開始面からの深さである加工深さ、工具進入/退出パターン、工具経路パターン、工具経路方向、壁許容残り代、床許容残り代が含まれる。加工フィーチャの種類は、表 2.1 に示す 4 種類の円柱形状と 8 種類の直方体形状をあわせた 12 種類と穴を組み合わせた 24 種類に図 2.8 の面取り部の加工フィーチャ 1 種類を加えた合計 25 種類である。加工フィーチャの寸法は、図 4.3 に示すように、工具軸方向の寸法  $h$ 、工具軸方向の面の長手方向の寸法  $l$ 、短手方向の寸法  $w$ 、対面する創成面間の最短距離  $d$  や創成面の最小コーナー半径  $r$  が含まれる。使用工具名は、加工工程で使用した工具名である。使用工具は、同じ名前の工具情報を工具情報データベースから検索することで、工具情報を取得する。加工方法は、図 4.4 に示すように、フェイスミル加工、輪郭加工、ポケット加工、らせん加工や穴加工の 5 種類である。作業情報は、CAM ソフトウェアのファイル形式で、作業情報データベースとして、一つのフォルダに保存されている。また、図 4.5 に示すように、このフォルダに保存されているすべての作業情報の番号、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法 ( $h, l, w$ )、ワークの材料や作業情報名の一覧が、作業情報データベースファイルとして CSV ファイル形式で、同じフォルダに保存されている。図 4.5 の No.2 のように作業情報が一つであれば、一気に加工される一方、No.1 のように作業情報が複数であれば、複数工程で加工される。また、データフォーマットは予め決定されているため、S45C と炭素鋼という記述が混在しないなど、データはばらつかない。

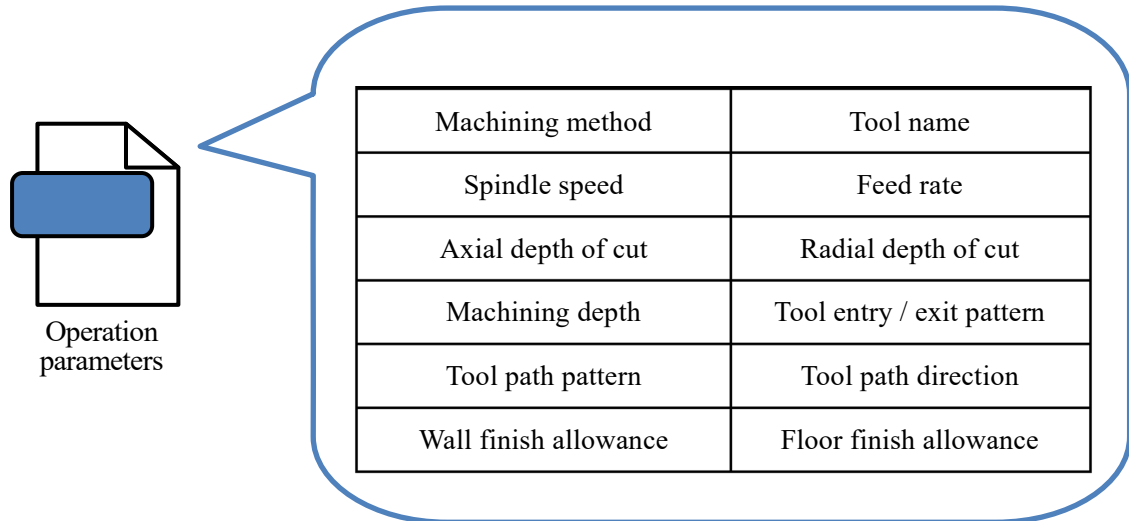


Fig.4.2 Operation parameters

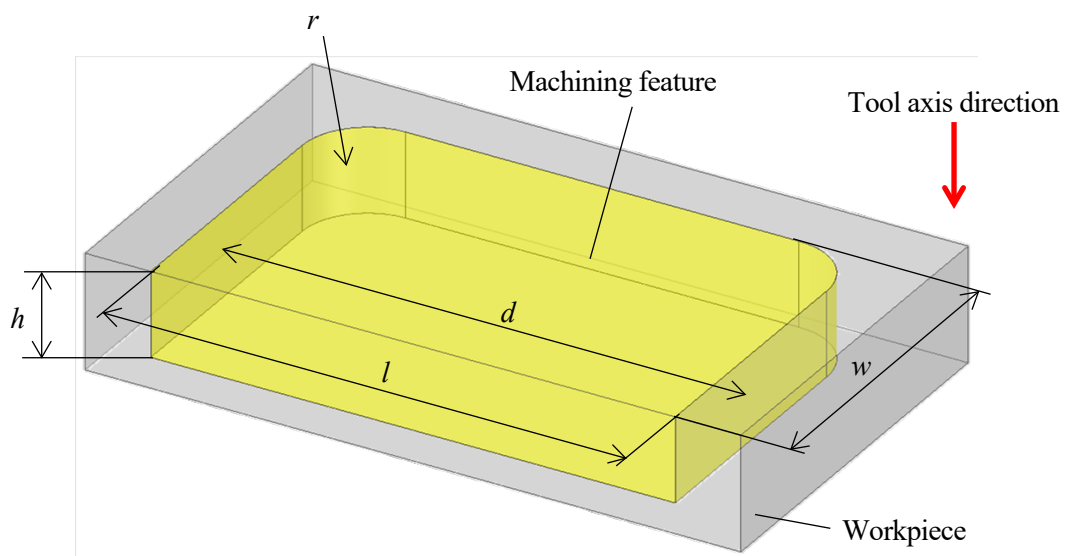


Fig.4.3 Machining feature dimensions

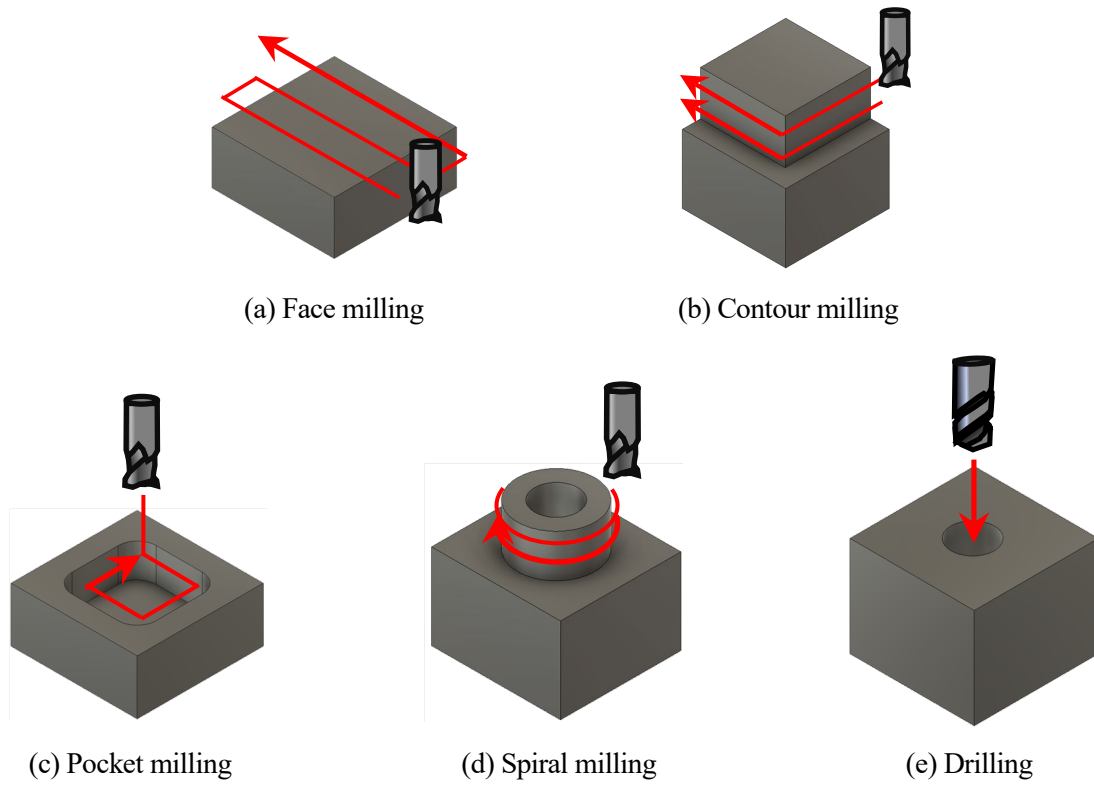


Fig.4.4 machining method

No.	Machining feature type	$h$	$l$	$w$	Workpiece material	operation parameters 1	operation parameters 2	..
1	Step	18	73	24	S45C	FC_1_1	FC_1_2	..
2	Step	7	90	35	SPCH	FC_2_1		..
3	Step	3	40	25	S45C	FC_3_1	FC_3_2	..
:	:	:	:	:	:	:	:	:

Fig.4.5 Operation parameters database file

#### 4.4 作業情報の推定の流れ

図 4.6 に示すように、ワークの材料、ワークの形状、部品の目標形状から、第 2 章で述べた上野らが提案した加工フィーチャ認識で認識した、加工対象の加工フィーチャ、工具情報データベースや作業情報データベースを入力情報として、作業情報を推定する。また、図 4.7 に作業情報の推定の流れを示す。加工対象の加工フィーチャに対して、解決したい問題と類似した過去の事例を修正して解を得る、事例ベース推論を用いて、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索し、検索した作業情報を修正することで、使用工具や切削条件といった作業情報を自動的に推定し、推定した作業情報を CAM ソフトウェアのファイル形式で出力する。このように、作業情報を修正することで、作業情報を推定するため、作業情報に含まれる加工現場特有のノウハウを利用できる。また、推定された作業情報を、作業情報データベースへ新たな作業情報として蓄積することができる。蓄積された新たな作業情報も、使用工具や切削条件などの作業情報の推定に利用されるようにするために、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度を、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新する。これにより、新たな作業情報を加工現場特有の新たな加工ノウハウとして利用でき、加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進できる。加えて、推定した作業情報を CAM ソフトウェアに自動的に入力し、CAM ソフトウェアで NC プログラムを自動的に生成する。本研究では、DP Technology 社製の CAM ソフトウェア ESPRIT の API 機能、アイコクアルファ株式会社製の 3 次元 CAD ソフトウェア Simple Modeler の API 機能を利用する。

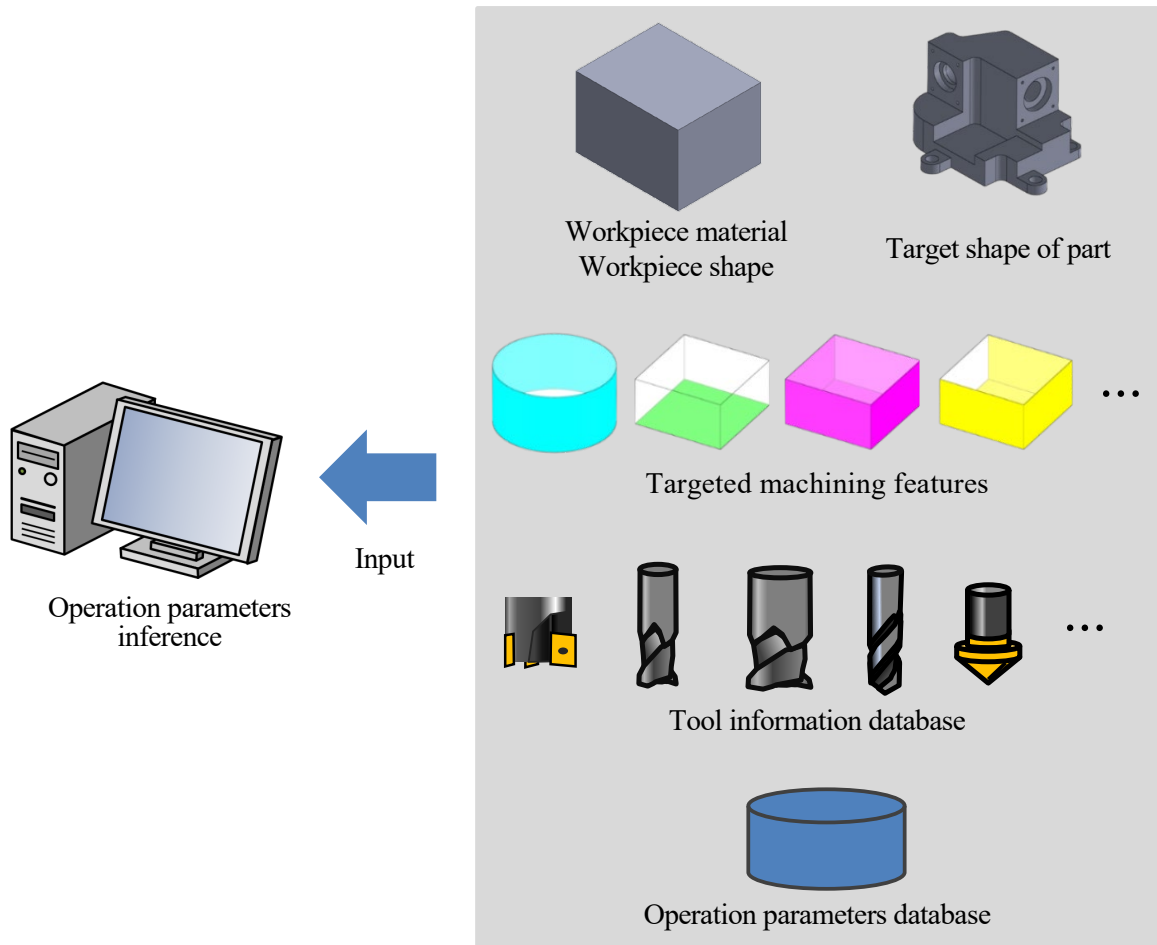


Fig.4.6 Input information for operation parameters inference

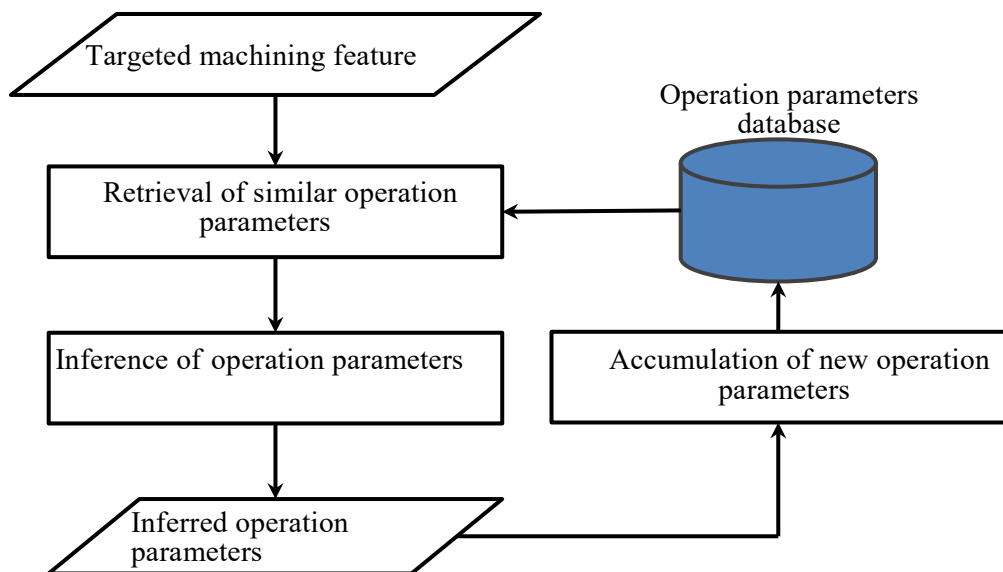


Fig.4.7 Flow of inference of operation parameters

## 4.5 類似の作業情報の検索

加工対象の加工フィーチャに対する、作業情報データベースからの類似の作業情報の検索について述べる。

### 4.5.1 類似の作業情報の検索器

類似の作業情報の検索器について述べる。図 4.8 に類似の作業情報を検索する流れを示す。作業情報を類似の作業情報の検索器へ入力し、類似の作業情報の検索器が、入力された作業情報に類似度を付与する。類似度は、検索対象と類似した作業情報に対しては大きな値となる。次に、付与した類似度を基に、作業情報を複数のクラスタに分割し、類似度が最も大きいクラスタの作業情報を、類似の作業情報として出力する。クラスタの分割には、初期クラスタ数を 2 とし、*k*-means 法で十分少ない数のクラスタに分割した後、各クラスタに対して、*k*-means 法での 2 分割を分割停止規準まで繰り返す、*x*-means 法<sup>43)</sup>を用いた。図 4.9 にクラスタの分割を示す。類似度の大きさを作業情報を並べ、類似度の中央値を境に二つのクラスタに分割する。作業情報の検索器へ入力する作業情報の数が奇数の場合、類似度の中央値となっている作業情報を、中央値と最も近い類似度のクラスタへ分類する。また、分割停止規準をベイズ情報量規準(Bayesian information criterion)とし、分割前のクラスタや *k*-means 法で 2 分割したクラスタのすべてでベイズ情報量規準を計算し、分割前のクラスタのベイズ情報量規準が小さくなるまでクラスタの分割を繰り返すことにより、最適なクラスタ数を決定する。加えて、図 4.10 に示すように、作業情報データベースから、加工フィーチャの種類での類似の作業情報の検索器 1、加工フィーチャの寸法での類似の作業情報の検索器 2、ワークの材料での類似の作業情報の検索器 3 の順に、検索した類似の作業情報を出力する。加工フィーチャの種類は、使用工具、加工方法、工具進入/退出パターンや工具経路パターンなど最も多くの作業情報に関わるため、類似した作業情報が 1 番目に優先される類似の作業情報の検索器 1 を加工フィーチャの種類とした。加工フィーチャの寸法は、使用工具に関係することから、寸法が近い作業情報を検索するため、類似した作業情報が 2 番目に優先される類似の作業情報の検索器 2 を加工フィーチャの寸法とした。ワークの材料は、切削条件に関与するが、加工フィーチャの寸法で検索した作業情報を用いることで、適切な切削条件が推定される可能性が高くなるため、類似した作業情報が 3 番目に優先される類似の作業情報の検索器 3 をワークの材料とした。最後に、出力される類似の作業情報から、任意の数の作業情報を抽出する。



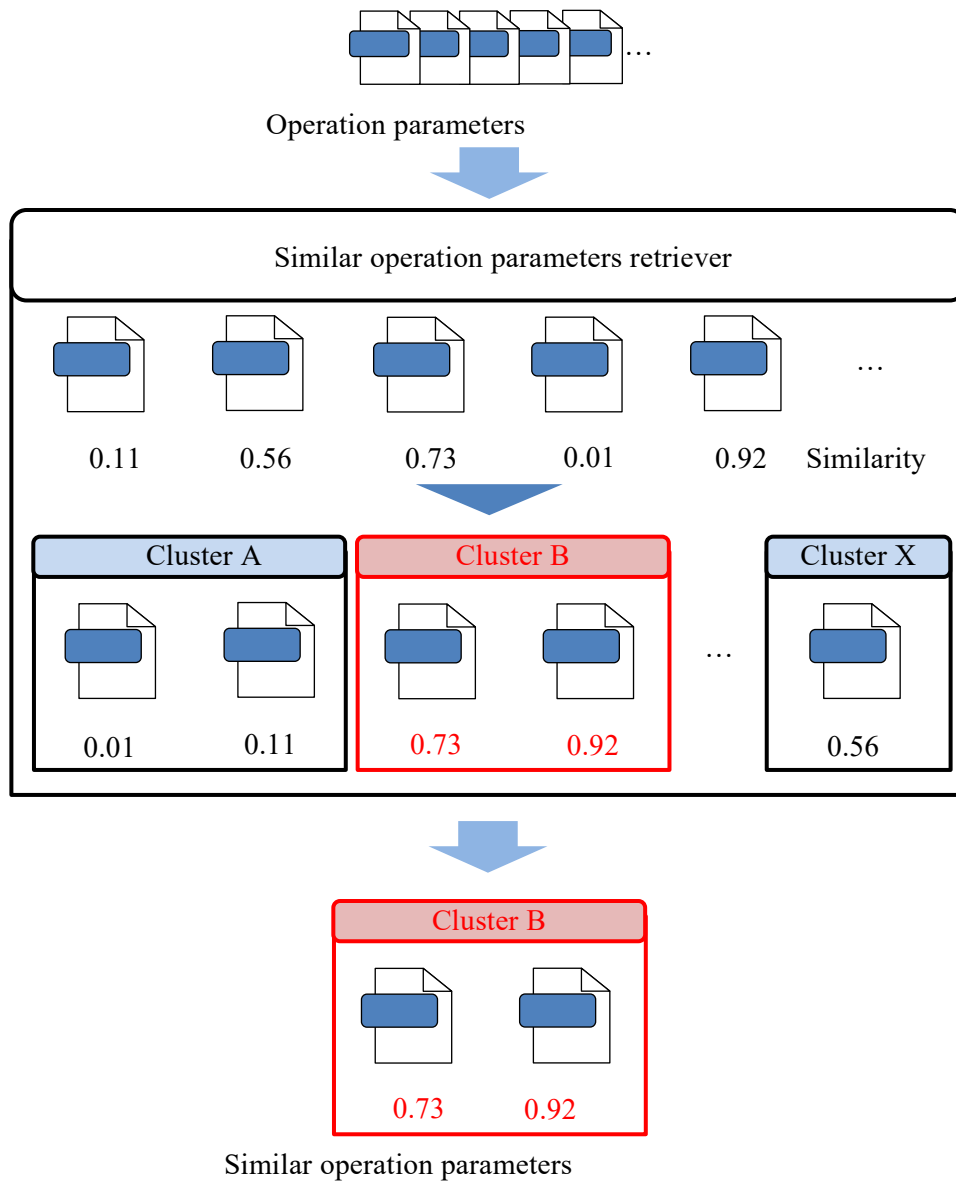


Fig.4.8 Flow of retrieval of similar operation parameters

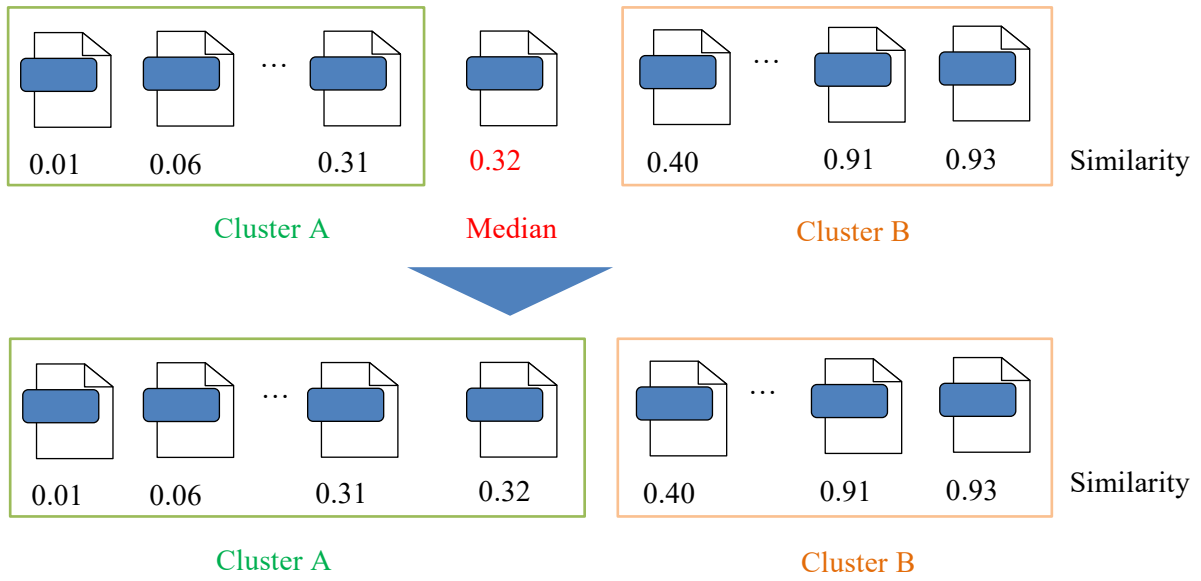


図 4.9 Cluster division

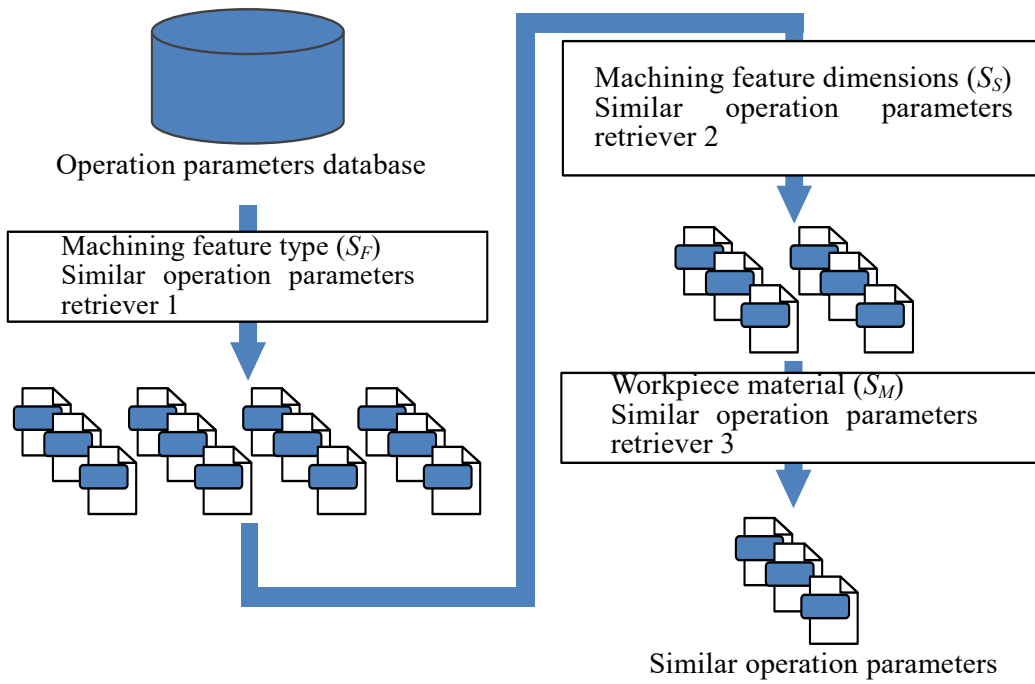


Fig.4.10 Flow of retrieval of similar operation parameters

### 4.5.2 加工フィーチャの種類の種類度の導出

類似の作業情報の検索器 1 では、表 4.1 に示すような、加工フィーチャの種類の種類度表を用いて、作業情報に類似度を付与し、加工フィーチャの種類が類似する作業情報を検索する。この加工フィーチャの種類の種類度の導出について述べる。加工フィーチャの種類と加工方法が関係することから、作業情報の加工方法を用いて、加工フィーチャの種類の種類度を導出する。まず、式(4.1)に示すように、加工フィーチャの種類毎に、作業情報データベースに蓄積されている加工方法毎の作業情報の数の特徴ベクトル  $v_i$  を導出する。

$$v_i = [\text{Machining method A}, \text{Machining method B}, \dots] \quad (4.1)$$

ここで、 $i$  は加工フィーチャの種類、*Machining method A*, *Machining method B*, ... は、作業情報データベースに蓄積されている加工方法毎の作業情報の数である。例えば、加工フィーチャの種類  $i$  の、*Machining method A* の作業情報が 20 件、*Machining method B* の作業情報が 6 件、*Machining method C* の作業情報が 32 件、その他は 0 件の場合、特徴ベクトルは、 $v_i = [20, 6, 32, 0, 0, \dots]$  となる。加工フィーチャの種類は、表 2.1 に示すように、4 種類の円柱形状と 8 種類の直方体形状をあわせた 12 種類、これらと穴を組み合わせた 24 種類、図 2.8 の面取り部の加工フィーチャ 1 種類の場合、合計 25 種類であることから、25 種類の特徴ベクトル  $v_i$  を導出する。次に、式(4.2)に示すように、コサイン類似度により加工フィーチャの種類の種類度  $S_F$  を導出する。

$$S_{F(j,k)} = \begin{cases} 0 & (|v_j| = 0 \text{ or } |v_k| = 0) \\ (v_j \cdot v_k) / (|v_j| |v_k|) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.2)$$

ここで、 $j$  および  $k$  は加工フィーチャの種類である。例えば、加工フィーチャの種類  $j$  の特徴ベクトル  $v_j = [0, 8, 2, 0, 0, \dots]$  (*Machining method B* の作業情報 8 件、*Machining method C* の作業情報 2 件、その他は 0 件)、加工フィーチャの種類  $k$  の特徴ベクトル  $v_k = [0, 2, 16, 0, 0, \dots]$  (*Machining method B* の作業情報 2 件、*Machining method C* の作業情報 16 件、その他は 0 件) の場合、加工フィーチャの種類の種類度は、 $S_{F(j,k)} = 0.36$  となる。

Table 4.1 Example of similarity table of machining feature type

	Blind hole	Face prismatic	Closed slot	Step
Blind hole	1.00	0.10	0.23	0.21
Face prismatic	0.10	1.00	0.21	0.40
Closed slot	0.23	0.21	1.00	0.36
Step	0.21	0.40	0.36	1.00

#### 4.5.3 加工フィーチャの寸法の類似度の導出

類似の作業情報の検索器2では、作業情報データベースに蓄積されている作業情報の加工フィーチャと加工対象の加工フィーチャを用いて、作業情報に類似度を付与し、加工フィーチャの寸法が類似する作業情報を検索する。この加工フィーチャの寸法の類似度の導出について述べる。式(4.3)や式(4.4)に示すように、工具軸方向の面の類似度と工具軸方向の寸法の類似度との積により、加工フィーチャの寸法の類似度  $S_s$  を導出する。

$$S_s = \frac{f(l_c/l_t) \cdot f(w_c/w_t)}{1 + \sqrt{(l_c/l_t - w_c/w_t)^2}} \times \left(1 - \frac{|h_c - h_t|}{h_c + h_t}\right) \quad (4.3)$$

$$f(a) = \begin{cases} (2-a)^{-1} & (0 < a < 1) \\ a^{-1} & (1 \leq a) \end{cases} \quad (4.4)$$

このとき、図4.11に示すように、 $h$ は工具軸方向の寸法、 $l$ は工具軸方向の面の長手方向の寸法、 $w$ は短手方向の寸法、 $c$ は作業情報の加工フィーチャ、 $t$ は加工対象の加工フィーチャ、 $a$ は作業情報の加工フィーチャと加工対象の加工フィーチャの寸法比である。工具軸方向の面の類似度は、作業情報の加工フィーチャの工具軸方向の面と加工対象の加工フィーチャの工具軸方向の面の相似性と大きさで表す。面の相似性は、式(4.3)の最初の項の分母で表され、相似であるほど、1に近い値になる。面の大きさは、式(4.3)の最初の項の分子や式(4.4)で表され、寸法比が1に近いほど、1に近い値になる。寸法の大きい加工フィーチャは、一般的に大きな工作機械を用いて高トルクな重切削で加工されるため、寸法の大きい加工フィーチャの作業情報は、小さな工作機械の仕様に合わない可能性が高い。そこで、式(4.4)は、加工対象より小さい寸法の加工フィーチャの作業情報を優先するため、寸法比1を境に非対称な関数としている。

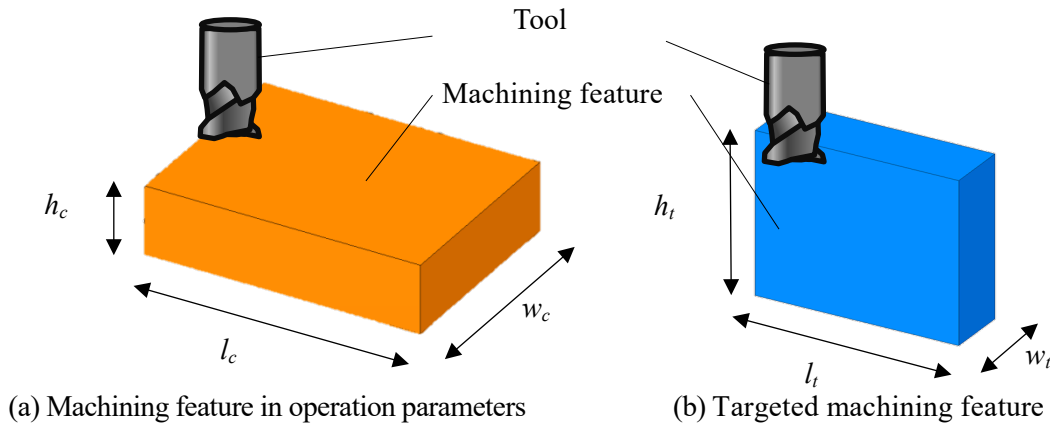


Fig.4.11 machining feature dimensions

#### 4.5.4 ワークの材料の類似度の導出

類似の作業情報の検索器 3 では、表 4.2 に示すような、ワークの材料の類似度表を用いて、作業情報に類似度を付与し、ワークの材料が類似する作業情報を検索する。このワークの材料の類似度の導出について述べる。まず、式(4.5)に示すように、ワークの材料毎に、作業情報データベースに蓄積されている作業情報の主軸回転数や送り速度などの作業情報の平均特徴ベクトル  $\bar{x}_\alpha$  を導出する。

$$\bar{x}_\alpha = \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ \bar{p}_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_\alpha = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{n=1}^{N_\alpha} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_n \quad (4.5)$$

ここで、 $\alpha$  は、ワークの材料である。例えば、作業情報データベースにワークの材料が  $A, B, C$  の 3 種類ある場合、 $\bar{x}_A, \bar{x}_B, \bar{x}_C$  が導出される。 $p$  は、主軸回転数や送り速度などのワークの材料と関連する作業情報を一つ以上任意に選択する。例えば、主軸回転数や送り速度の二つを選択した場合、主軸回転数が  $3000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度が  $200 \text{ mm/min}$  のとき、 $p_1=3000, p_2=200$  となる。 $N_\alpha$  は、作業情報データベースにあるワークの材料  $\alpha$  の作業情報の数である。例えば、作業情報データベースにワークの材料  $A$  の作業情報が 15 件ある場合、 $N_A=15$  となる。次に、式(4.6)に示すように、ワークの材料毎に導出された平均特徴ベクトル  $\bar{x}_\alpha$  を用いて、ワークの材料の類似度  $S_M$  を導出する。

$$S_{M(\zeta, \eta)} = 1 - \frac{d_M(\bar{x}_\zeta, \bar{x}_\eta)}{\max_{\beta, \gamma \in D} (d_M(\bar{x}_\beta, \bar{x}_\gamma))} \quad (4.6)$$

ここで  $\zeta$  (ゼータ) や  $\eta$  (イータ) は類似度を導出するワークの材料、 $D$  は作業情報データベースのワークの材料の集合である。 $d_M$  はマハラノビス距離であり、ワークの材料  $\zeta$  や  $\eta$  のマハラノビス距離は、式(4.7)のように示される。

$$d_M(\bar{x}_\zeta, \bar{x}_\eta) = \sqrt{(\bar{x}_\zeta, \bar{x}_\eta)^T \Sigma^{-1} (\bar{x}_\zeta, \bar{x}_\eta)} \quad (4.7)$$

ここで  $\Sigma^{-1}$  はすべての平均特徴ベクトルを用いて導出される分散共分散行列、 $\beta$  や  $\gamma$  (ガンマ) は、 $D$  の集合のうち、マハラノビス距離が最大となるワークの材料の組合せである。例えば、 $D=\{A, B, C\}$  で、送り速度や一刃あたりの送りを選択して平均特徴ベクトル導出したとき、ワークの材料  $A$  の平均特徴ベクトル  $\bar{x}_A = [142 \text{ (m/min)}, 0.0185 \text{ (mm/blade)}]$ 、ワークの材料  $B$  の平均特徴ベクトル  $\bar{x}_B = [229, 0.0414]$ 、ワークの材料  $C$  の平均特徴ベクトル  $\bar{x}_C = [112, 0.0199]$  である場合、マハラノビス距離は、式(4.7)を用いて、 $d_M(\bar{x}_A, \bar{x}_A) = d_M(\bar{x}_B, \bar{x}_B) = d_M(\bar{x}_C, \bar{x}_C) = 0$ 、 $d_M(\bar{x}_A, \bar{x}_B) = 1.83$ 、 $d_M(\bar{x}_B, \bar{x}_C) = 2.01$ 、 $d_M(\bar{x}_C, \bar{x}_A) = 0.73$  と導出され、最大のマハラノビス距離は  $d_M(\bar{x}_B, \bar{x}_C)$  であることから、 $(\beta, \gamma) = (B, C)$  となり、式(4.6)より  $S_{M(A, B)} = 0.09$ 、 $S_{M(C, A)} = 0.64$  と算出される。

Table 4.2 Example of similarity table of workpiece material

	A5052	S45C	SUS304	SPCH
A5052	1.00	0.72	0.63	0.56
S45C	0.72	1.00	0.61	0.59
SUS304	0.63	0.61	1.00	0.91
SPCH	0.56	0.59	0.91	1.00

#### 4.6 作業情報の推定

加工対象の加工フィーチャに対して、類似の作業情報の検索器により作業情報データベースから抽出された任意の数の作業情報から、加工対象の加工フィーチャに対する作業情報を推定する。

加工方法は、図 4.12 に示すように、Through hole など創成面が工具軸方向と平行な円筒面となる円柱形状の加工フィーチャの場合、(c)~(e)のうち、抽出された作業情報で最も多い方法を選択する。Through pocket などそれ以外の加工フィーチャの場合、(a)~(c)のうち、抽出された作業情報で最も多い方法を選択する。

壁許容残り代や床許容残り代は、それぞれ抽出された作業情報の平均値とする。

使用工具は、Through hole など創成面が円筒面の加工フィーチャの場合、加工方法が(c)や(d)の場合はエンドミルを選択する一方、加工方法が(e)の場合はエンドミルやドリル

から選択する。面取り部の加工フィーチャの場合、フェイスミル、エンドミルや面取り工具から選択する。Through pocket などそれ以外の加工フィーチャの場合、フェイスミルやエンドミルから選択する。図 4.3 に示す加工フィーチャの寸法の一つである対面する創成面間の最短距離  $d$  未満で、創成面に工具軸方向と平行な円筒面がある場合は、創成面の最小コーナー半径  $r$  の直径  $2r$  未満で、最大径の工具を選択する。

主軸回転数、送り速度、工具軸方向切り込み深さ、工具径方向切り込み深さの切削条件は、送り速度や一刀あたりの送りを一定とした先行研究<sup>39)</sup>の修正式で修正する。この修正の際、刃数、工具の材料、工具のコーティング有無やワークの材料も考慮するため、切削条件に修正係数を掛ける。修正係数  $\kappa$  は、式(4.8)に示すように、表 4.3、表 4.4、表 4.5 や表 4.6 に例として示す刃数、工具の材料、工具のコーティング有無、ワークの材料の修正表を用いて導出する。

$$\kappa = \frac{bn_t}{bn_c} \times \frac{tm_t}{tm_c} \times \frac{tc_t}{tc_c} \times \frac{wm_t}{wm_c} \quad (4.8)$$

ここで、 $bn$  は表 4.3 の刃数の修正表より得られた値、 $tm$  は表 4.4 の工具の材料の修正表より得られた値、 $tc$  は表 4.5 の工具コーティング有無の修正表より得られた値、 $wm$  は表 4.6 のワークの材料の修正表より得られた値、 $c$  は作業情報の加工フィーチャ、 $t$  は加工対象の加工フィーチャである。

加工深さは、図 4.11 に示すような、加工フィーチャの工具軸方向の寸法  $h$  に合わせて修正する。

工具進入/退出パターンは、利用する CAM ソフトウェアにおける、図 4.13 に示すような、工具軸方向と平行に進入/退出する Plunge、斜めに進入/退出する Rump、らせん状に進入する Helical、工具軸方向と垂直に進入/退出する Side の 4 種類である。この 4 種類から、加工フィーチャの種類や創成面を参照して、抽出された作業情報で最も多い工具進入/退出パターンを選択する。ただし、例えば、図 4.14(a)に示すように、Open pocket などの開いたポケット形状の加工フィーチャの場合、抽出された作業情報で最も多い工具進入/退出パターンを選択する。図 4.14 (b)に示すように、Closed pocket などの閉じたポケット形状の加工フィーチャの場合、工具が工具軸方向と垂直な面に進入できないため、Side 以外の抽出された作業情報で最も多い工具進入/退出パターンを選択する。

工具経路パターンは、利用する CAM ソフトウェアにおける、図 4.15 に示すような、6 種類から、加工フィーチャの種類や創成面を参照して、抽出された作業情報で最も多い工具進入/退出パターンを選択する。ただし、例えば、Open pocket などのポケット形状の加工フィーチャの場合、図 4.15(c)~(f)から、抽出された作業情報で最も多い工具進

入/退出パターンを選択する。創成面が工具軸方向と平行な円筒面となる円柱形状の加工フィーチャの場合、図 4.15 の(d)を選択する。

工具経路方向は、抽出された作業情報で最も多い工具経路方向を選択する。ただし、例えば、工具経路パターンが、図 4.15(a)や図 4.15 (b)のいずれかで、Open slot のような対面する創成面ペアの数が1つある加工フィーチャの場合、それらの創成面と平行な方向を選択する。それ以外の加工フィーチャの場合、工具軸方向に直交する方向のうち、加工フィーチャの長手方向と平行な方向を選択する。

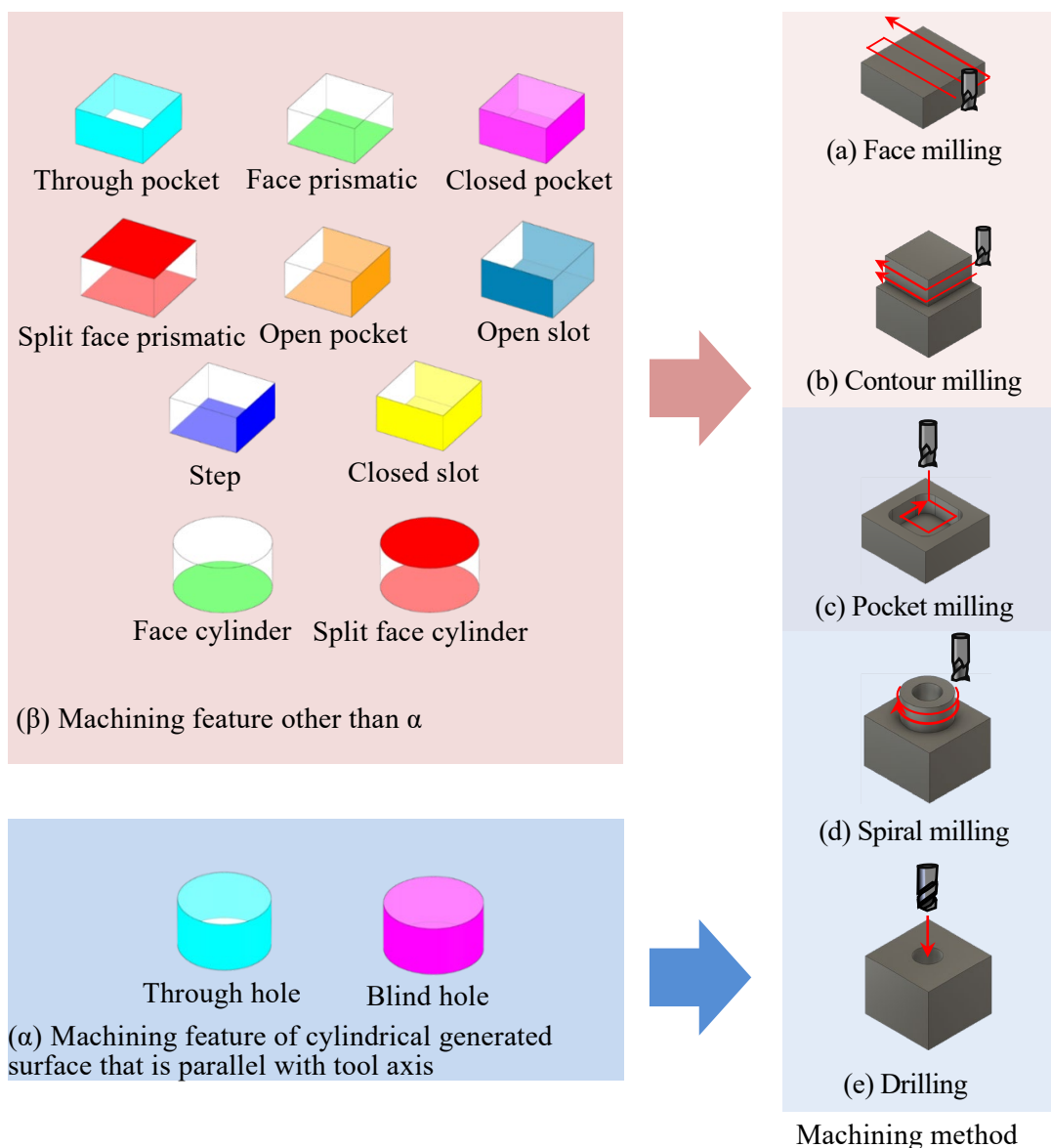


Fig.4.12 machining method decision by machining feature type



Table 4.3 Example of modification table of number of flutes

Number of flutes ( <i>bn</i> )	Spindle speed	Feed rate
2	100	100
4	100	125
:	:	:

Table 4.4 Example of modification table of tool material

Tool material ( <i>tm</i> )	Spindle speed	Feed rate
CB	100	100
HSS	50	100
:	:	:

Table 4.5 Example of modification table of tool coating

Tool coating ( <i>tc</i> )	Spindle speed	Feed rate
Coated	200	125
Uncoated	100	100

Table 4.6 Example of modification table of workpiece material

Workpiece material ( <i>wm</i> )	主軸回転数	送り速度
S45C	100	100
SUS304	60	70
A5052	140	110
SS400	110	110
:	:	:

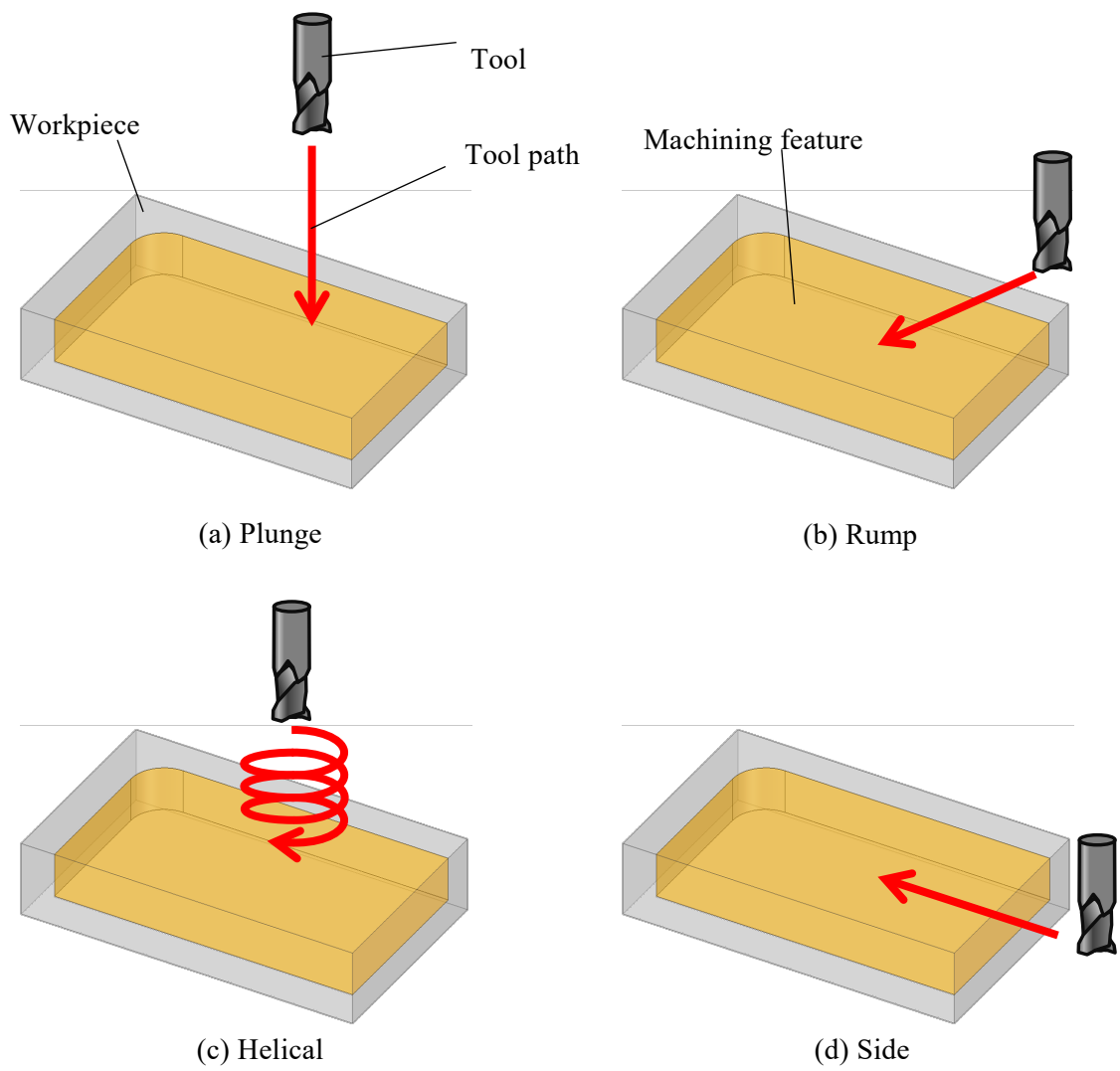


Fig.4.13 Tool entry / exit pattern

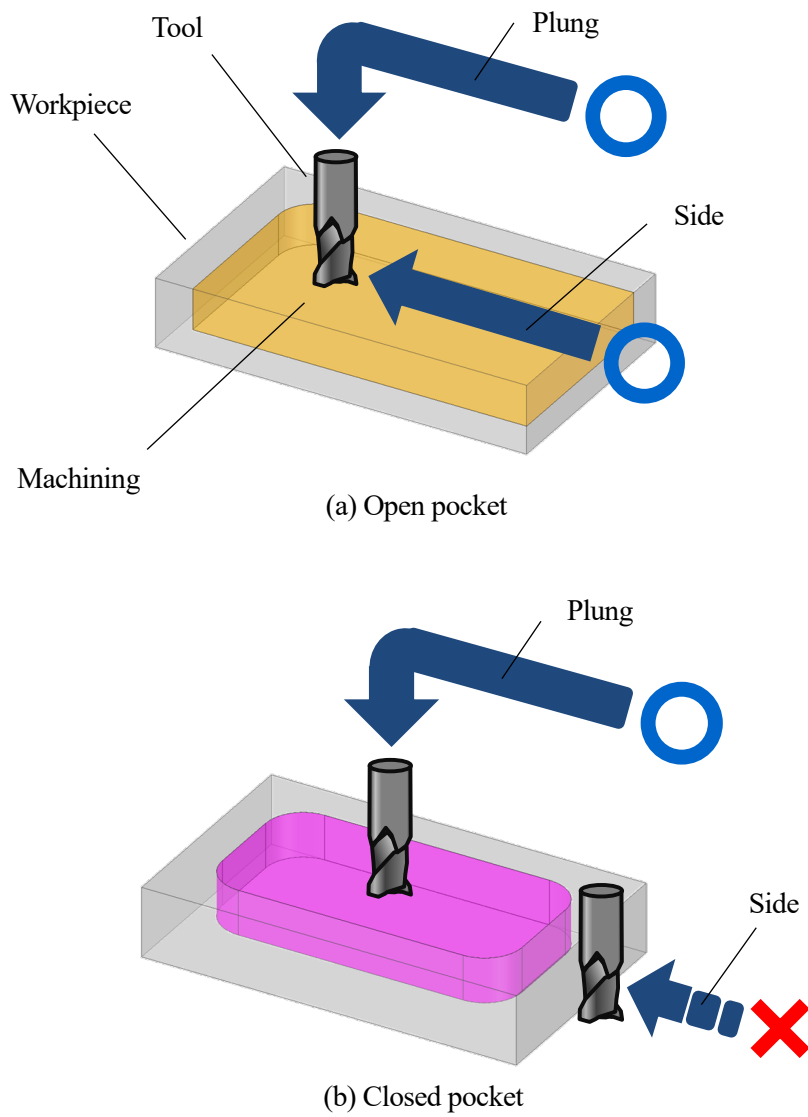


Fig.4.14 Candidates of tool entry pattern

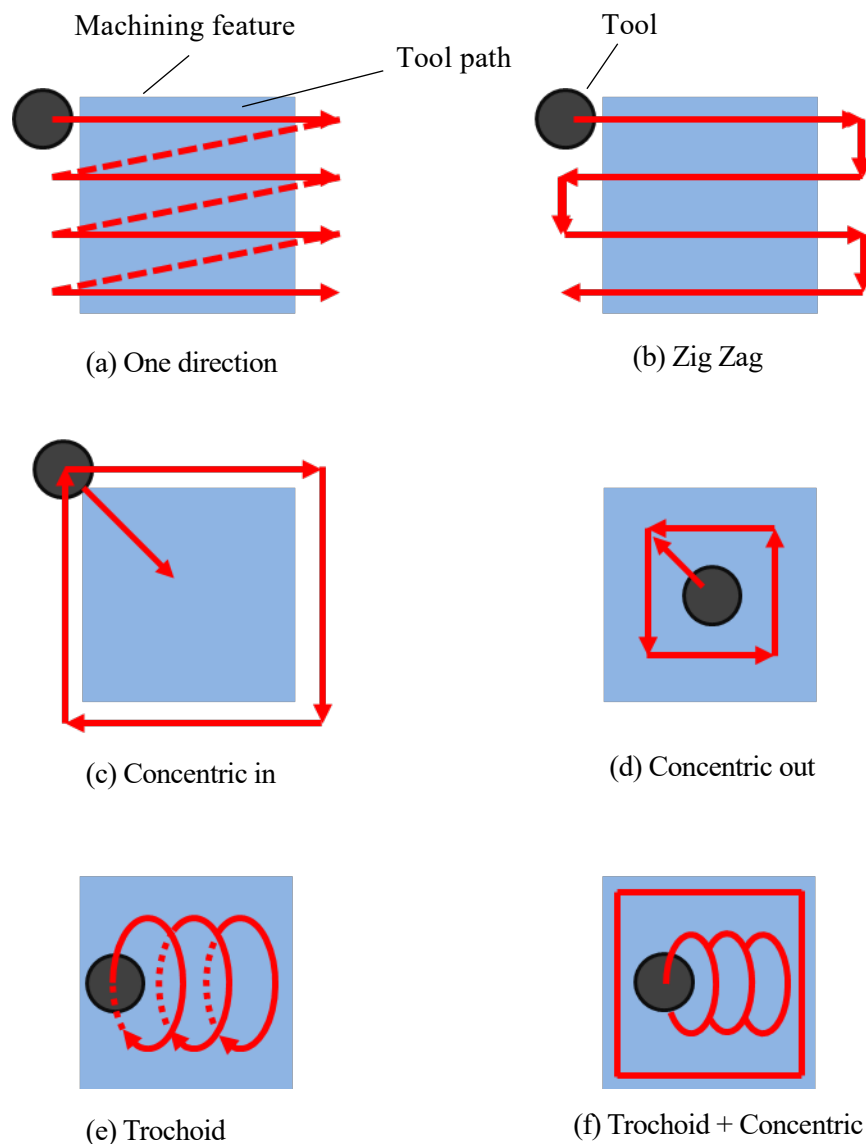


Fig.4.15 Tool path pattern

#### 4.7 作業情報の推定のケーススタディ

機械部品加工メーカーより提供を受けた作業情報を用いて、部品加工を想定したケーススタディにより、作業情報の推定の有効性を検証した結果について述べる。

ケーススタディで用いる、ワークの材料は A5052 とした。図 4.16 にワークの形状と部品の目標形状を示す。図 4.17 に加工対象の加工フィーチャの加工順序、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法、対面する創成面間の最短距離や創成面の最小コーナー半径を示す。図 4.18 に CAD ソフトウェアに入力されたワークの形状、部品の目標形状や加工対象の加工フィーチャを示す。作業情報の推定では、始めに、CAD ソフトウェアからワークの形状、部品の目標形状や加工対象の加工フィーチャを取得する。また、工具情報を表

4.7に示す。作業情報データベースAは、265件の作業情報が保存されている。保存されている作業情報は、図4.4に示す加工方法、表2.1に示す4種類の円柱形状、8種類の直方体形状をあわせた12種類と穴を組み合わせた24種類、図2.8の面取り部の加工フィーチャ1種類の合計25種類のいずれかである。以上の情報を入力として、作業情報を推定した。

入力した作業情報データベースを基に、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度が自動で更新される。作業情報データベースAを基に自動で更新された、加工フィーチャの種類の類似度表の一部を表4.8に、ワークの材料の類似度表を表4.9に示す。ワークの材料の類似度の導出には、送り速度と一刃あたりの送りを選択した。類似の作業情報の検索器1では、表4.8に示す加工フィーチャの種類の類似度表を用いて、類似の作業情報の検索器3では、表4.9に示すワークの材料の類似度表を用いて、作業情報に類似度を付与する。

作業情報データベースAから図4.17の加工順序7に類似の作業情報を検索する流れを図4.19に示す。作業情報に表4.8に示す加工フィーチャの種類の類似度表を用いて類似度 $S_F$ を付与し、付与した類似度 $S_F$ を基に、作業情報をクラスタ $C_{F1}$ ,  $C_{F2}$ ,  $C_{F3}$ に分割し、類似度 $S_F$ が最も大きいクラスタ $C_{F1}$ の作業情報に類似度 $S_S$ を付与し、付与した類似度 $S_S$ を基に、作業情報をクラスタ $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$ に分割し、類似度 $S_S$ が最も大きいクラスタ $C_{S1}$ の作業情報に表4.9に示すワークの材料の類似度表を用いて類似度 $S_M$ を付与し、付与した類似度 $S_M$ を基に、作業情報をクラスタ $C_{M1}$ ,  $C_{M2}$ に分割し、類似度 $S_M$ が最も大きいクラスタ $C_{M1}$ の作業情報から、任意の数の作業情報を抽出されている。また、本ケーススタディでは、式(4.9)に示すように、抽出した任意の数の作業情報の類似度 $S_T$ をそれぞれ導出し、導出した類似度 $S_T$ が最大の作業情報を選択する。

$$S_T = x \times S_F + y \times S_S + z \times S_M \quad (4.9)$$

ここで、 $x$ は加工フィーチャの種類の類似度の重み、 $y$ は加工フィーチャの寸法の類似度の重み、 $z$ はワークの材料の類似度の重みである。これら三つの類似度の重みは、加工精度や加工時間のように、作業者が重視する事柄に応じて決定する。本ケーススタディでは、加工フィーチャの種類の類似度を優先するため、加工フィーチャの種類の類似度の重み $x$ は $10^4$ 、加工フィーチャの寸法の類似度の重み $y$ は $10^2$ 、はワークの材料の類似度の重み $z$ は1とした。

類似の作業情報の検索器により、作業情報データベースAから図4.17の加工順序7に類似の作業情報が選択された。図4.17の加工順序7に対して、選択された類似の作業情報と4.6節で述べた方法で推定された作業情報を表4.10に示す。

加工方法は、加工フィーチャの種類が Through pocket であるため、類似の作業情報の加工方法と同じ輪郭加工が選択されている。

使用工具は、加工フィーチャの種類が Through pocket であるため、表 4.7 のフェイスミルやエンドミルが候補となる。加工フィーチャの対面する創成面間の最短距離が 28 mm である一方、創成面の最小コーナー半径が 2.5 mm であるため、5 mm 未満となることから、 $\phi 4$  mm のエンドミルが選択されている。

切削条件は、先行研究<sup>39)</sup>の修正式で修正されている。

主軸回転数は、ワークの材料の修正係数が表 4.6 のワークの材料の修正表より 140/60、類似の作業情報の主軸回転数が 1326 rpm、工具径が  $\phi 12$  mm、推定された作業情報の選択されたエンドミルの工具径が  $\phi 4$  mm であるため、 $(140/60) \times 1326 \times 12 \div 4 = 9282$  rpm に修正されている。

送り速度は、一刃あたりの送りを一定とし、ワークの材料の修正係数が表 4.6 のワークのより材料の修正表 110/70、類似の作業情報の送り速度が 477 mm/min、主軸回転数が 1326 rpm、推定された作業情報の主軸回転数が 9282 rpm であるため、 $(110/70) \times 477 \times 9282 \div 1326 = 5247$  mm/min に修正されている。

工具軸方向切り込み深さは、類似の作業情報の工具軸方向切り込み深さが 12 mm、工具径が  $\phi 12$  mm、推定された作業情報の選択されたエンドミルの工具径が  $\phi 4$  mm であるため、 $12 \times 4 \div 12 = 4$  mm に修正されている。

工具径方向切り込み深さは、類似の作業情報の工具径方向切り込み深さが 8.4 mm、工具径が  $\phi 12$  mm、推定された作業情報の選択されたエンドミルの工具径が  $\phi 4$  mm であるため、 $8.4 \times 4 \div 12 = 2.8$  mm に修正されている。

加工深さは、加工順序 7 の加工フィーチャの工具軸方向の寸法に合わせて 11.4 mm に修正されている。

工具進入/退出パターンは、加工フィーチャの種類が through pocket であり、工具が工具軸方向と垂直な面に進入できないため、類似の作業情報の工具進入/退出パターンの Side ではなく、工具が工具軸方向の面に進入/退出する Plunge が選択されている。

工具経路パターン/工具経路方向は、類似の作業情報の加工方法と同じ工具経路パターン Concentric out、工具経路方向 CCW が選択されている。

このように、各加工順序で加工対象にあわせて作業情報が推定される。表 4.11 に作業情報データベース A から選択された類似の作業情報と推定された作業情報の一部を示す。使用工具は、加工順序 1 では、対面する創成面ペアや創成面に工具軸方向と平行な円筒面が存在しないため、表 4.7 に示す工具情報で最大の工具径のフェイスミル  $\phi 50$  が選択

されている。加工順序2では、対面する創成面ペアや創成面に工具軸方向と平行な円筒面が存在しないが、創成面に工具軸方向と平行な方向の側面が存在するため、工具の種類は、底面と側面を同時に加工できるエンドミルが選択され、表4.7に示す工具情報でエンドミルの最大の工具径の $\phi 25\text{ mm}$ が選択されている。加工工程3~6では、加工フィーチャの工具軸方向の面の寸法と等しい工具径のドリルが選択されている。加工工程7~13では、加工フィーチャの寸法の一つである対面する創成面間の最短距離や創成面の最小コーナー半径 $r$ の直径 $2r$ 未満で、最大径の工具が選択されている。切削条件は、すべての加工順序において、選択される使用工具の変化により、修正されている。工具進入/退出パターンは、加工順序7や加工順序8では、加工フィーチャの種類がThrough pocketであることから、SideからPlungeへと修正されている。このように、すべての加工順序で加工対象にあわせて作業情報が推定されている。

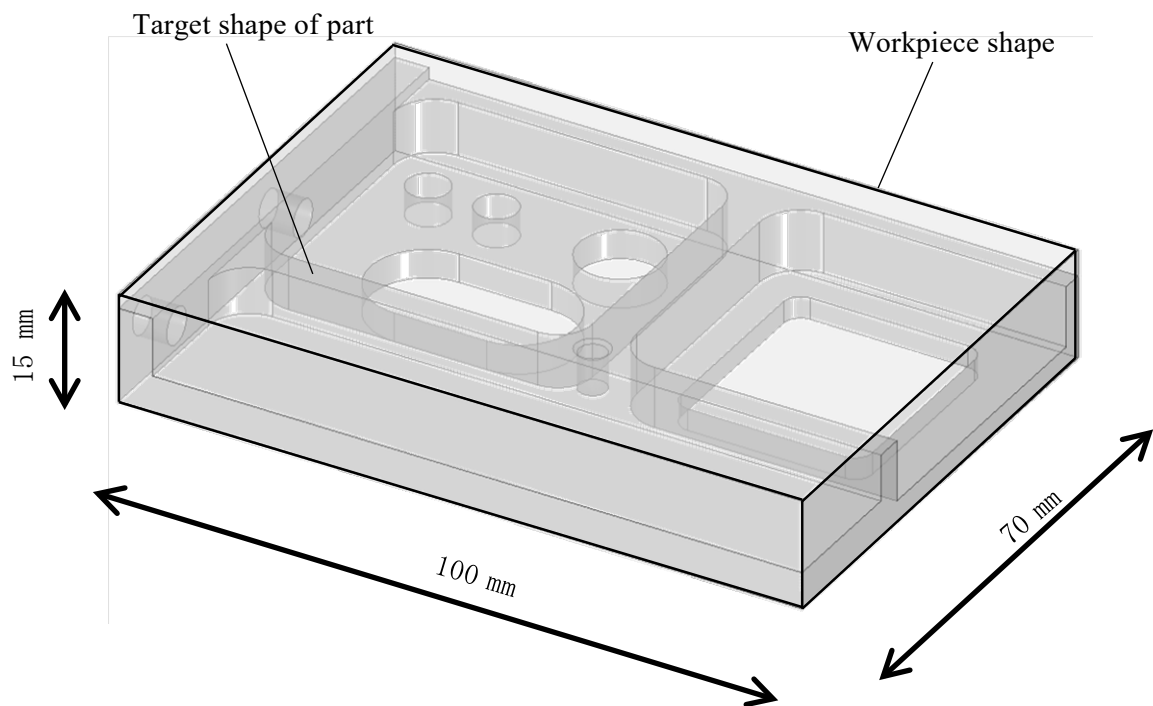


Fig.4.16 Workpiece shape and target shape of part for case study

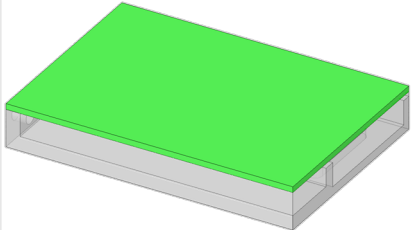
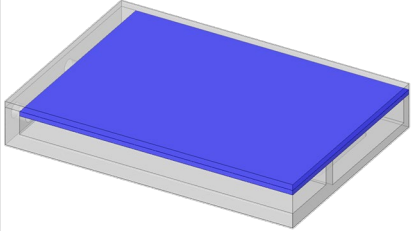
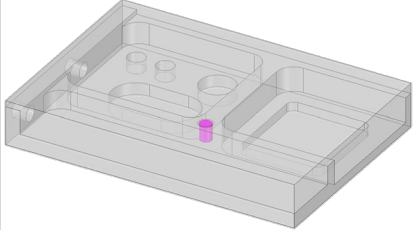
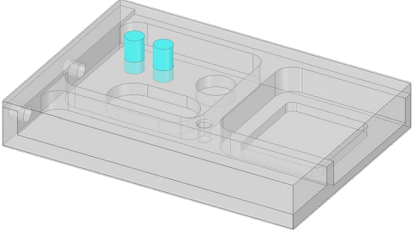
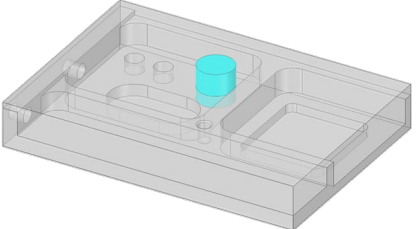
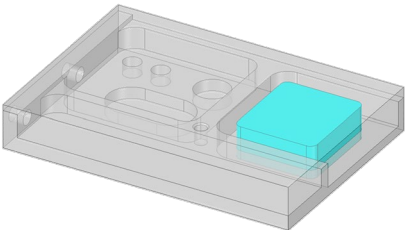
	Machining sequence	Machining feature type Machining feature dimensions( $l, w, h$ ) Shortest distance of opposite generated surfaces $d$ Minimum corner radius of generated surfaces $r$
1		Face prismatic (100, 70, 2) [mm] - -
2		Step (95, 70, 1.6) [mm] - -
3		Blind hole (4, 4, 6) [mm] - 2 [mm]
4, 5		Through hole (6.1, 6.1, 11.4) [mm] - 3.05 [mm]
6		Through hole (12, 12, 11.4) [mm] - 6 [mm]
7		Through pocket (31, 28, 11.4) [mm] 28 [mm] 2.5 [mm]

Fig.4.17 Machining sequence and targeted machining features (continue)



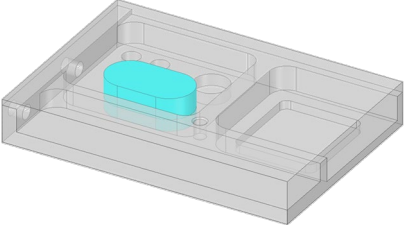
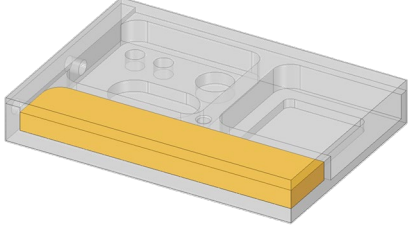
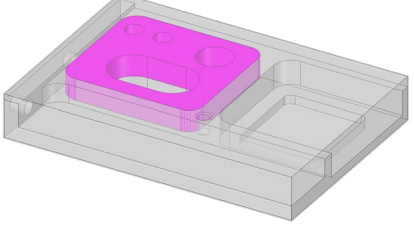
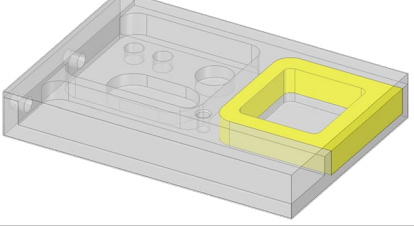
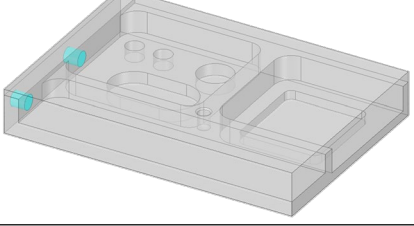
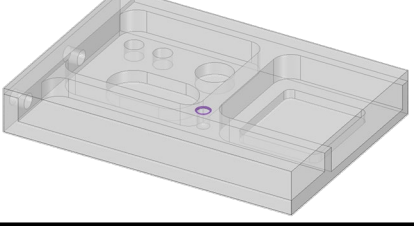
	Machining sequence	Machining feature type Machining feature dimensions( $l, w, h$ ) Shortest distance of opposite generated surfaces $d$ Minimum corner radius of generated surfaces $r$
8		Through pocket (30, 16.5, 11.4) [mm] 16.5 [mm] 8.25 [mm]
9		Open pocket (95, 20, 6.4) [mm] - 6 [mm]
10		Closed pocket (47.5, 43, 7.4) [mm] 43 [mm] 5[mm]
11		Closed slot (43, 41.5, 8.4) [mm] 43[mm] 6 [mm]
12, 13		Through hole (5, 5, 5) [mm] - 2.5 [mm]
14		Chamfer (5, 5, 0.5) [mm] - 2.5 [mm]

Fig.4.17 Machining sequence and targeted machining features

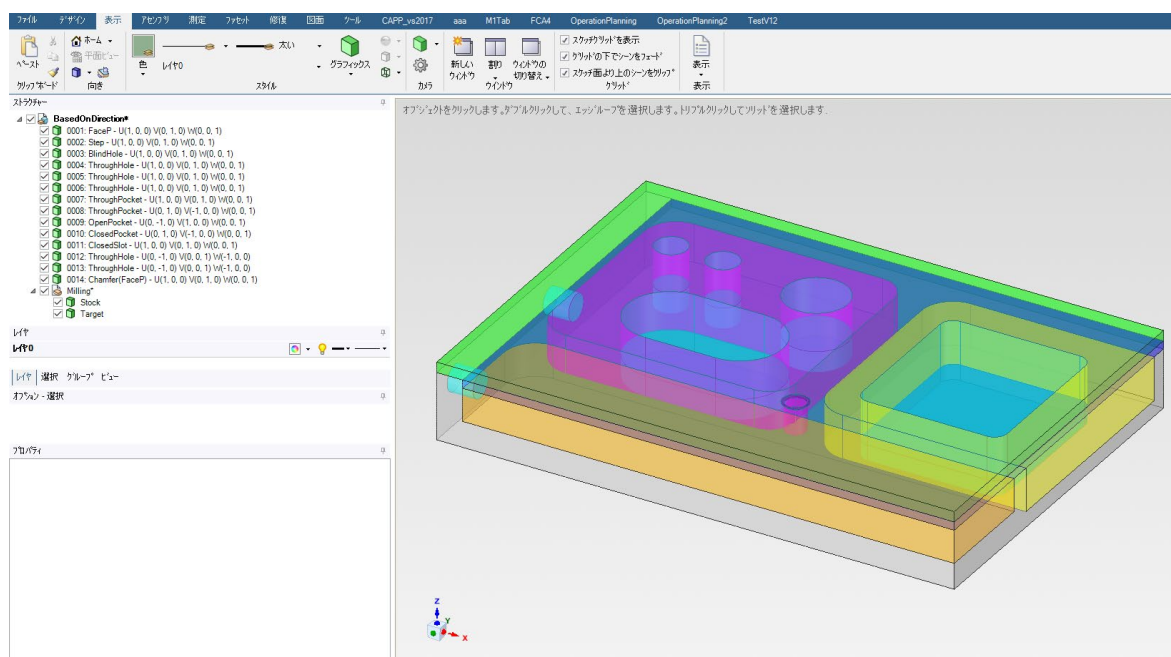


Fig.4.18 Workpiece shape, target shape of part and target machining features in CAD software

Table 4.7 Tool information

Tool type	Tool radius	Number of flutes	Tool material	Tool coating
Face mill	50	4	CB	Coated
End mill	25	2	HSS	Uncoated
End mill	14	2	HSS	Uncoated
End mill	10	2	HSS	Uncoated
End mill	8	2	HSS	Uncoated
End mill	4	2	HSS	Uncoated
Drill	12	2	HSS	Coated
Drill	6.1	2	HSS	Coated
Drill	4	2	HSS	Coated
Chamfer	-	4	CB	Coated

Table 4.8 Similarity table of machining feature type regarding operation parameters database A

	Through hole	Face Cylinder	Blind hole	Split face Cylinder	Through pocket	Face Prismatic	Closed pocket	Split face Prismatic	Open pocket	Open slot	Step	Closed slot	Chamfer
Through hole	1.00	0.01	1.00	0.00	0.04	0.01	0.30	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.92
Face Cylinder	0.01	1.00	0.04	0.00	0.00	0.67	0.57	0.00	0.42	0.39	0.41	0.46	0.19
Pocket hole	1.00	0.04	1.00	0.00	0.06	0.02	0.34	0.00	0.08	0.08	0.08	0.08	0.93
Split face Cylinder	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Through pocket	0.04	0.00	0.06	0.00	1.00	0.33	0.53	0.00	0.80	0.83	0.82	0.76	0.34
Face Prismatic	0.01	0.67	0.02	0.00	0.33	1.00	0.17	0.00	0.26	0.27	0.27	0.25	0.11
Closed pocket	0.30	0.57	0.34	0.00	0.53	0.17	1.00	0.00	0.91	0.89	0.90	0.93	0.64
Split face Prismatic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Open pocket	0.04	0.42	0.08	0.00	0.80	0.26	0.91	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.44
Open slot	0.04	0.39	0.08	0.00	0.83	0.27	0.89	0.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.44
Step	0.04	0.41	0.08	0.00	0.82	0.27	0.90	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.44
Closed slot	0.04	0.46	0.08	0.00	0.76	0.25	0.93	0.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.44
Chamfer	0.92	0.19	0.93	0.00	0.34	0.11	0.64	0.00	0.44	0.44	0.44	0.44	1.00

Table 4-9 Similarity table of workpiece material regarding operation parameters database A

	FC	SUS304	A7075	S45C	A5052	SUS404	SUS316	SGD290	SPHC
FC	1.00	0.66	0.56	0.46	0.37	0.30	0.30	0.30	0.56
SUS4304	0.66	1.00	0.46	0.65	0.68	0.63	0.63	0.63	0.89
A7075	0.56	0.46	1.00	0.60	0.36	0.26	0.26	0.26	0.44
S45C	0.46	0.65	0.60	1.00	0.74	0.63	0.63	0.63	0.71
A5052	0.37	0.68	0.36	0.74	1.00	0.89	0.89	0.89	0.79
SUS404	0.30	0.63	0.26	0.63	0.89	1.00	1.00	1.00	0.74
SUS316	0.30	0.63	0.26	0.63	0.89	1.00	1.00	1.00	0.74
SGD290	0.30	0.63	0.26	0.63	0.89	1.00	1.00	1.00	0.74
SPHC	0.56	0.89	0.44	0.71	0.79	0.74	0.74	0.74	1.00

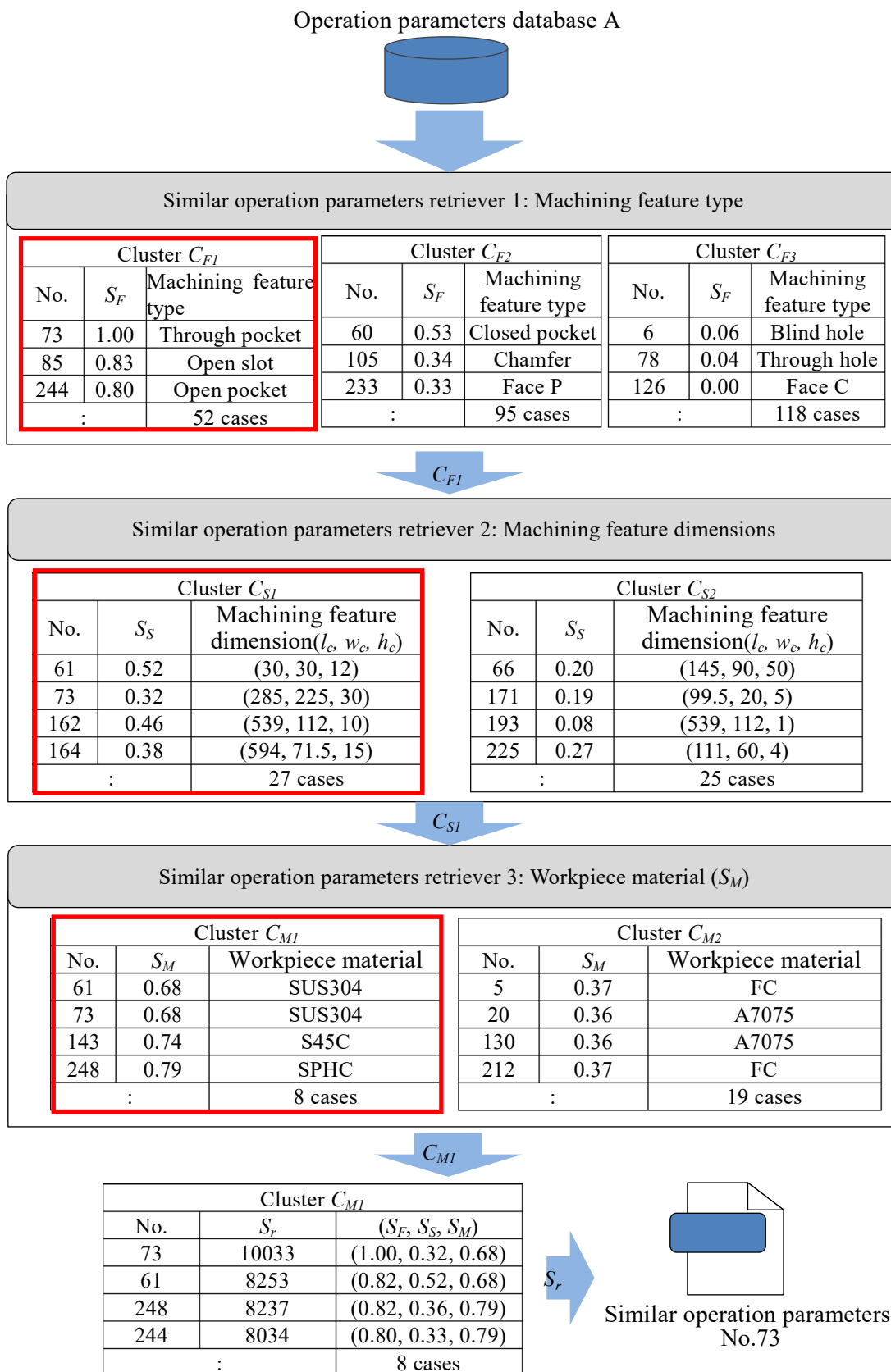


Fig.4.19 Flow of retrieval of similar operation parameters regarding machining sequence 7 from operation parameters database A

Table 4.10 retrieval of similar operation parameters regarding machining sequence 7 and inferred operation parameters

	Similar operation parameters	Inferred operation parameters
Machining method	Contour milling	Contour milling
Tool	End mill $\phi 12$	End mill $\phi 4$
Spindle speed [rpm]	1326	9282
Feed rate [mm/min]	477	5247
Axial depth of cut [mm]	12	4
Radius depth of cut [mm]	8.4	2.8
Machining depth [mm]	30	11.4
Tool entry pattern	Side	Plunge
Tool exit pattern	Side	Plunge
Tool path pattern	Concentric out	Concentric out
Tool path direction	CCW	CCW

Table 4.11 similar operation parameters and Inferred operation parameters regarding operation parameters database A

Machining sequence	No.	Machining method / Tool Spindle speed [rpm] / Feed rate [mm/min.] Axial depth of cut [mm] / Radial depth of cut [mm] Tool entry pattern / Tool exit pattern	
		similar operation parameters	Inferred operation parameters
1	192	Face milling / Face mill $\phi$ 80 1090 / 1308 0.5 / 62 Side / Side	Face milling / Face mill $\phi$ 50 2442 / 2686 0.5 / 38.8 Side / Side
2	193	Pocket milling / Face mill $\phi$ 80 1090 / 1308 0.5 / 60 Side / Plunge	Pocket milling / End mill $\phi$ 25 4883 / 4297 0.47 / 18.75 Side / Plunge
3	51	Drilling / Drill $\phi$ 2.8 3638 / 218 - / - - / -	Drilling / Drill $\phi$ 4 2547 / 153 - / - - / -
4, 5	261	Drilling / Drill $\phi$ 9 2470 / 371 - / - - / -	Drilling / Drill $\phi$ 6.1 8503 / 2004 - / - - / -
6	245	Drilling / Drill $\phi$ 11 570 / 104 - / - - / -	Drilling / Drill $\phi$ 12 732 / 146 - / - - / -
7	73	Contour milling / End mill $\phi$ 12 1326 / 477 12.0 / 8.4 Side / Side	Contour milling / End mill $\phi$ 4 9282 / 5251 4.0 / 2.8 Plunge / Plunge
8	73	Contour milling / End mill $\phi$ 12 1326 / 477 12.0 / 8.4 Side / Side	Contour milling / End mill $\phi$ 14 2652 / 1500 11.4 / 9.8 Plunge / Plunge
9	171	Contour milling / End mill $\phi$ 20 1980 / 594 0.5 / 0.5 Side / Side	Contour milling / End mill $\phi$ 10 5544 / 1830 0.25 / 0.25 Side / Side
10	146	Pocket milling / End mill $\phi$ 8 5010 / 1503 5.0 / 0.8 Rump / Plunge	Pocket milling / End mill $\phi$ 8 7014 / 1852 4.0 / 0.8 Rump / Plunge
11	76	Contour milling / End mill $\phi$ 16 1592 / 573 1.5 / 11.2 Side / Rump	Contour milling / End mill $\phi$ 10 5941 / 3361 1.9 / 7.0 Side / Rump
12, 13	56	Spiral milling / End mill $\phi$ 16 2149 / 473 - / - Plunge / Plunge	Spiral milling / End mill $\phi$ 4 2057 / 149 - / - Plunge / Plunge
14	260	Drilling / Chamfer 350 / 35 - / - - / -	Drilling / Chamfer 204 / 40 - / - - / -

#### 4.8 推定した作業情報の蓄積

推定された作業情報を、新たな作業情報として作業情報データベースへ蓄積することができる。蓄積された新たな作業情報も、使用工具や切削条件などの作業情報の推定に利用されるようにするために、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度を、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新することが望ましい<sup>44)</sup>。また、加工現場毎に作業情報データベースに蓄積された作業情報が異なるため、作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度も加工現場に応じて異なるのが自然である。そこで、本研究では、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる表 4.1 の加工フィーチャの種類の類似度表や表 4.2 のワークの材料の類似度表を、作業情報データベースに蓄積された作業情報と関連付けている。新たな作業情報を作業情報データベースに蓄積すると、式(4.1)の特徴ベクトルや式(4.5)の平均特徴ベクトルが変化するため、表 4.1 の加工フィーチャの種類の類似度表や表 4.2 のワークの材料の類似度表が自動で更新されるため、その前後で、類似の作業情報の検索により出力される作業情報が変化する。表 4.1 の加工フィーチャの種類の類似度表が自動で更新される例として、作業情報データベースに加工フィーチャの種類  $j$  の *Machining method A* の作業情報が 20 件、*Machining method B* の作業情報が 6 件、*Machining method C* の作業情報が 13 件、加工フィーチャの種類  $k$  の *Machining method B* の作業情報が 8 件、*Machining method C* の作業情報が 45 件の蓄積により、加工フィーチャの種類  $j$  の特徴ベクトル  $v_j=[0, 8, 2, 0, 0]$ 、加工フィーチャの種類  $k$  の特徴ベクトル  $v_k=[0, 2, 16, 0, 0]$ 、類似度  $S_{F(i, k)}=0.36$  から  $v_j=[20, 14, 15, 0, 0]$ 、 $v_k=[0, 10, 61, 0, 0]$ 、 $S_{F(i, k)}=0.60$  へ自動で更新される。このように、蓄積された新たな作業情報も、切削条件や使用工具などの作業情報の推定に利用されるようにするために、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度を自動で更新する。これにより、新たな作業情報を加工現場特有の新たな加工ノウハウとして利用でき、加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進する。

#### 4.9 推定した作業情報の蓄積のケーススタディ

加工現場では、作業情報データベースに作業情報が蓄積される。そのため、加工現場で作業情報データベースに作業情報が蓄積されることを想定したケーススタディにより、作業情報の推定の有効性を検証した結果について述べる。

推定した作業情報の蓄積のケーススタディでは、類似の作業情報の検索と作業情報の



推定のケーススタディで使用した作業情報データベース A に 210 件の作業情報が蓄積された作業情報データベース B を使用する。作業情報データベース以外の条件は類似の作業情報の検索と作業情報の推定のケーススタディと同じである。

作業情報データベース A や作業情報データベース B を基に自動で更新された、加工フィーチャの種類類似度表の一部を表 4.12 に、ワークの材料の類似度表を表 4.13 に示す。各表の上段に作業情報データベース A での類似度を示す。また、各表の下段に作業情報データベース B での類似度を示す。作業情報データベース A に 210 件の作業情報が蓄積され、式(4.1)の特徴ベクトルや式(4.5)の平均特徴ベクトルが変化するため、各表の類似度の値が変化していることを表している。また、蓄積した 210 件の作業情報に新たなワークの材料が含まれていたため、表 4.9 に比べ、表 4.13 には YH や S45CH の行と列が増えている。

作業情報データベース B から図 4.17 の加工順序 7 に類似の作業情報を検索する流れを図 4.20 に示す。210 件の作業情報が蓄積されたため、図 4.19 の作業情報データベース A から図 4.17 の加工順序 7 に類似の作業情報を検索する流れに比べ、類似の作業情報の検索器 1:加工フィーチャの種類や類似の作業情報の検索器 3:ワークの材料のクラスタ数が増え、新たに蓄積された作業情報が選択されている。

表 4.14 に作業情報データベース A や作業情報データベース B を基に推定された作業情報の一部を示す。加工順序 1, 4~9 や 14 で異なる作業情報が推定された。加工方法は、加工順序 1 ではフェイスミル加工からポケット加工に、加工順序 4, 5 では穴加工かららせん加工に、加工順序 7~9 では輪郭加工からポケット加工に変化している。使用工具は、加工順序 4, 5 では加工方法の変化により、ドリルからエンドミルに変化している。切削条件は、選択された作業情報の使用工具や切削条件の違いから、加工順序 1, 4, 5, 7~9, 14 では変化している。工具進入/退出パターンは、選択された作業情報の使用工具や切削条件の違いから、加工工程 1 では Side / Side から Plunge / Rump, 加工工程 4, 5 では Helical / Plunge, 加工工程 9 では Side / Side から Plunge / Plunge に変化している。以上から、作業情報データベースへの作業情報の蓄積により、推定される作業情報が変化することを確認した。

Table 4.12 Similarity table of machining feature type regarding operation parameters database A -> B

	Through hole	Face Cylinder	Blind hole	Split face Cylinder	Through pocket	Face Prismatic	Closed pocket	Split face Prismatic	Open pocket	Open slot	Step	Closed slot	Chamfer
Through hole	1.00	0.01	1.00	0.00	0.04→0.15	0.01	0.30→0.07	0.00	0.04→0.02	0.04→0.02	0.04→0.02	0.04→0.02	0.92→0.98
Face Cylinder	0.01	1.00	0.04→0.06	0.00	0.00→0.54	0.67→0.72	0.57→0.68	0.00	0.42→0.59	0.39→0.57	0.41→0.40	0.46→0.65	0.19→0.09
Pocket hole	1.00	0.04→0.06	1.00	0.00	0.06→0.24	0.02→0.04	0.34→0.15	0.00	0.08→0.11	0.08→0.12	0.08→0.12	0.08→0.11	0.93→0.99
Split face Cylinder	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Through pocket	0.04→0.15	0.00→0.54	0.06→0.24	0.00	1.00	0.33→0.31	0.53→0.90	0.00	0.80→0.99	0.83→0.99	0.82→0.96	0.76→0.95	0.34
Face Prismatic	0.01	0.67→0.72	0.02→0.04	0.00	0.33→0.31	1.00	0.17→0.19	0.00	0.26→0.29	0.27→0.30	0.27→0.36	0.25→0.23	0.11→0.08
Closed pocket	0.30→0.07	0.57→0.68	0.34→0.15	0.00	0.53→0.90	0.17→0.19	1.00	0.00	0.91→0.94	0.89→0.93	0.90→0.76	0.93→0.99	0.64→0.22
Split face Prismatic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Open pocket	0.04→0.02	0.42→0.59	0.08→0.11	0.00	0.80→0.99	0.26→0.29	0.91→0.94	0.00	1.00	1.00	1.00→0.93	1.00→0.98	0.44→0.21
Open slot	0.04→0.02	0.39→0.57	0.08→0.12	0.00	0.83→0.99	0.27→0.30	0.89→0.93	0.00	1.00	1.00	1.00→0.95	0.99→0.97	0.44→0.22
Step	0.04→0.02	0.41→0.40	0.08→0.12	0.00	0.82→0.96	0.27→0.36	0.90→0.76	0.00	1.00→0.93	1.00→0.95	1.00	1.00→0.57	0.44→0.23
Closed slot	0.04→0.02	0.46→0.65	0.08→0.11	0.00	0.76→0.95	0.25→0.23	0.93→0.99	0.00	1.00→0.98	0.99→0.97	1.00→0.57	1.00	0.44→0.19
Chamfer	0.92→0.98	0.19→0.09	0.93→0.99	0.00	0.34	0.11→0.08	0.64→0.22	0.00	0.44→0.21	0.44→0.22	0.44→0.23	0.44→0.19	1.00

Table 4.13 Similarity table of workpiece material regarding operation parameters database A -&gt; B

	FC	SUS304	A7075	S45C	A5052	SUS404	SUS316	SGD290	SPHC	YH	S45CH
FC	1.00	0.66→ 0.60	0.56	0.46→ 0.45	0.37→ 0.70	0.30→ 0.24	0.30→ 0.24	0.30→ 0.24	0.56→ 0.67	0.00→ 0.32	0.00→ 0.36
SUS304	0.66→ 0.60	1.00	0.46→ 0.40	0.65	0.68→ 0.88	0.63	0.63	0.63	0.89→ 0.93	0.00→ 0.71	0.00→ 0.50
A7075	0.56	0.46→ 0.40	1.00	0.60→ 0.56	0.36→ 0.42	0.26→ 0.17	0.26→ 0.17	0.26→ 0.17	0.44→ 0.47	0.00→ 0.27	0.00→ 0.59
S45C	0.46→ 0.45	0.65	0.60→ 0.56	1.00	0.74→ 0.57	0.63→ 0.59	0.63→ 0.59	0.63→ 0.59	0.71→ 0.66	0.00→ 0.69	0.00→ 0.85
A5052	0.37→ 0.70	0.68→ 0.88	0.36→ 0.42	0.74→ 0.57	1.00	0.89→ 0.51	0.89→ 0.51	0.89→ 0.51	0.79→ 0.91	0.00→ 0.59	0.00→ 0.43
SUS404	0.30→ 0.24	0.63	0.26→ 0.17	0.63→ 0.59	0.89→ 0.51	1.00	1.00	1.00	0.74→ 0.57	0.00→ 0.90	0.00→ 0.47
SUS316	0.30→ 0.24	0.63	0.26→ 0.17	0.63→ 0.59	0.89→ 0.51	1.00	1.00	1.00	0.74→ 0.57	0.00→ 0.90	0.00→ 0.47
SGD290	0.30→ 0.24	0.63	0.26→ 0.17	0.63→ 0.59	0.89→ 0.51	1.00	1.00	1.00	0.74→ 0.57	0.00→ 0.90	0.00→ 0.47
SPHC	0.56→ 0.67	0.89→ 0.93	0.44→ 0.47	0.71→ 0.66	0.79→ 0.91	0.74→ 0.57	0.74→ 0.57	0.74→ 0.57	1.00	0.00→ 0.65	0.00→ 0.52
YH	0.00→ 0.32	0.00→ 0.71	0.00→ 0.27	0.00→ 0.69	0.00→ 0.59	0.00→ 0.90	0.00→ 0.90	0.00→ 0.90	0.00→ 0.65	0.00→ 1.00	0.00→ 0.56
S45CH	0.00→ 0.36	0.00→ 0.50	0.00→ 0.59	0.00→ 0.85	0.00→ 0.43	0.00→ 0.47	0.00→ 0.47	0.00→ 0.47	0.00→ 0.52	0.00→ 0.56	0.00→ 1.00

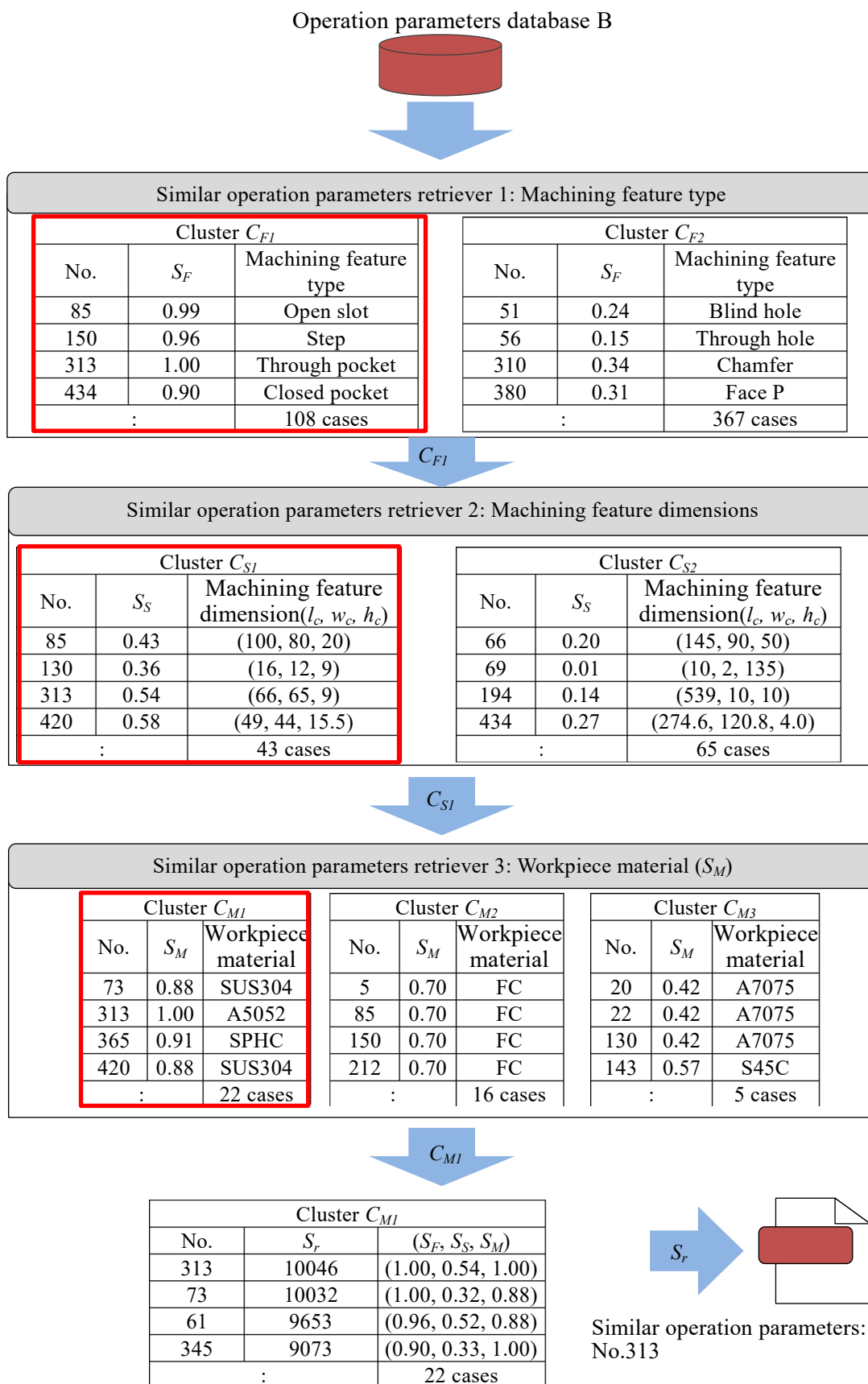


Fig.4.20 Flow of retrieval of similar operation parameters regarding machining sequence 7 from operation parameters database A

Table 4.14 Inferred operation parameters regarding operation parameters database A and B

Machining sequence	No.	Machining method / Tool Spindle speed [rpm] / Feed rate [mm/min.] Axial depth of cut [mm] / Radial depth of cut [mm] Tool entry pattern / Tool exit pattern	
		operation parameters database A	operation parameters database B
		1	192
2	193	Pocket milling / End mill $\phi$ 25 4883 / 4297 0.47 / 18.75 Side / Plunge	
3	51	Drilling / Drill $\phi$ 4 2547 / 153 - / - - / -	
4, 5	261	Drilling / Drill $\phi$ 6.1 8503 / 2004 - / - - / -	358 Spiral milling / End mill $\phi$ 4 1989 / 62 - / - Helical / Plunge
6	245	Drilling / Drill $\phi$ 12 732 / 146 - / - - / -	362 Drilling / Drill $\phi$ 12 732 / 146 - / - - / -
7	73	Contour milling / End mill $\phi$ 4 9282 / 5251 4.0 / 2.8 Plunge / Plunge	313 Pocket milling / End mill $\phi$ 4 3000 / 704 1.8 / 0.25 Plunge / Plunge
8	73	Contour milling / End mill $\phi$ 14 2652 / 1500 11.4 / 9.8 Plunge / Plunge	296 Pocket milling / End mill $\phi$ 14 1817 / 1015 7.0 / 0.88 Plunge / Plunge
9	171	Contour milling / End mill $\phi$ 10 5544 / 1830 0.25 / 0.25 Side / Side	400 Pocket milling / End mill $\phi$ 10 2890 / 483 0.83 / 7.5 Plunge / Plunge
10	146	Pocket milling / End mill $\phi$ 4 7014 / 1852 4.0 / 0.8 Rump / Plunge	
11	76	Contour milling / End mill $\phi$ 4 5941 / 3361 1.9 / 7.0 Side / Rump	
12, 13	56	Spiral milling / End mill $\phi$ 4 2057 / 149 - / - Plunge / Plunge	
14	260	Drilling / Chamfer 204 / 40 - / - - / -	310 Drilling / Chamfer 625 / 78.1 - / - - / -

また、表 4.15 に機械部品加工メーカより提供を受けた実際の加工で用いられた作業情報と、475 件の作業情報が蓄積されたデータベース B を用いて推定された作業情報の加工時間の比較の一部を示す。機械部品加工メーカより提供を受けた実際の加工で用いられた作業情報と 475 件の作業情報が蓄積されたデータベース B を用いて推定された作業情報で同じような加工時間であることが分かる。475 件の作業情報が蓄積されたデータベース B を用いて推定された作業情報の加工時間が長い理由は、切削条件の式(4.8)の修正係数に用いる刃数などの表 4.3~4.6 の修正表が安全側に設定されているためである。

Table 4.15 Machining time regarding actual machining and inferred operation parameters

Machining feature	Machining time	
	operation parameters used actual machining	operation parameters database B
Through pocket 1	0:03:52	0:06:13
Through pocket 2	0:02:56	0:04:57
Through pocket 3	0:01:05	0:01:12
Through pocket 4	0:02:56	0:04:57
Through pocket 5	0:02:56	0:04:57
Face prismatic 1	0:00:17	0:00:28
Face prismatic 2	0:00:17	0:00:28

#### 4.10 製品製造情報を反映した作業情報の推定

前節で述べた作業情報の推定では、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法やワークの材料の三つの事例検索器で作業情報データベースから加工対象の加工フィーチャと類似の作業情報を抽出する。しかしながら、図 4.21 のように、作業情報データベースには、荒加工のみの作業情報や荒加工と仕上げ加工の作業情報が蓄積されており、荒加工の加工条件が、仕上げ加工の有無で変わる可能性がある。そこで、図 4.22(a)に示すように、加工対象の加工フィーチャに製品製造情報が受け渡されていない場合は、仕上げ加工が不要と判断し、荒加工のみの作業情報データベースから類似の作業情報を抽出

し、図 4.22(b)に示すように、加工対象の加工フィーチャに製品製造情報が受け渡されている場合は、仕上げ加工が必要と判断し、荒加工と仕上げ加工の作業情報データベースから類似の作業情報を抽出する。加工対象の加工フィーチャに、製品製造情報が受け渡されているか否かで、検索する作業情報データベースを切り替えることで、仕上げ加工の有無を反映する。ただし、仕上げ加工は、論理的に切削条件が決められるため、作業情報の推定では扱わない。

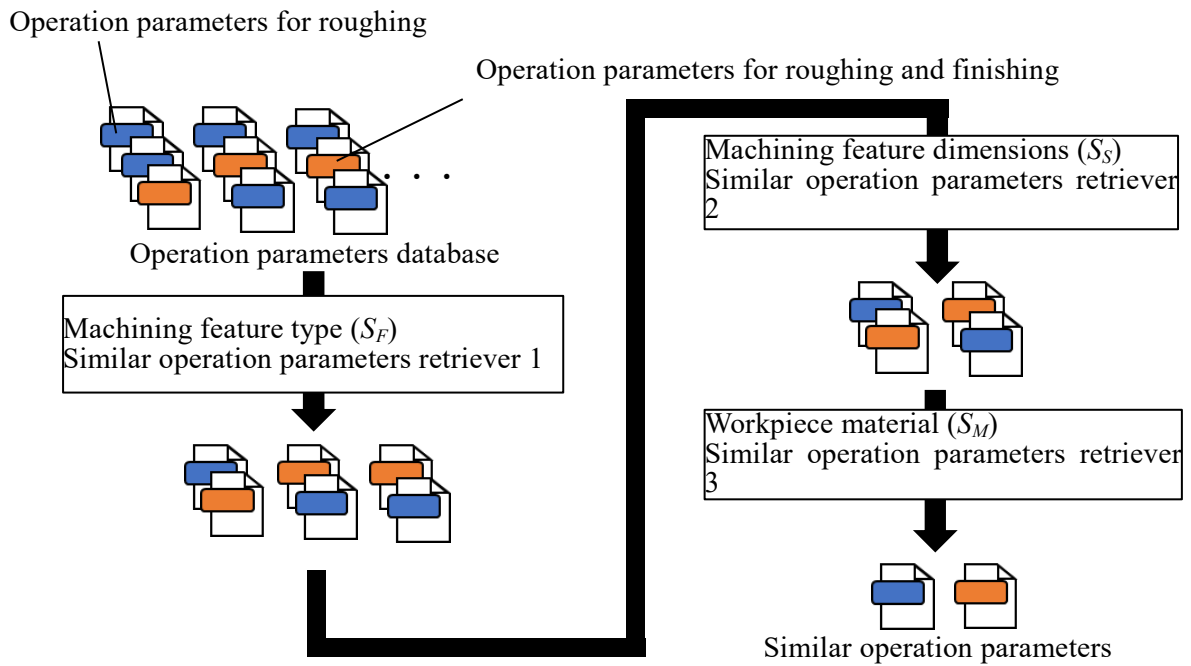


Fig.4.21 Flow of retrieval of similar operation parameters

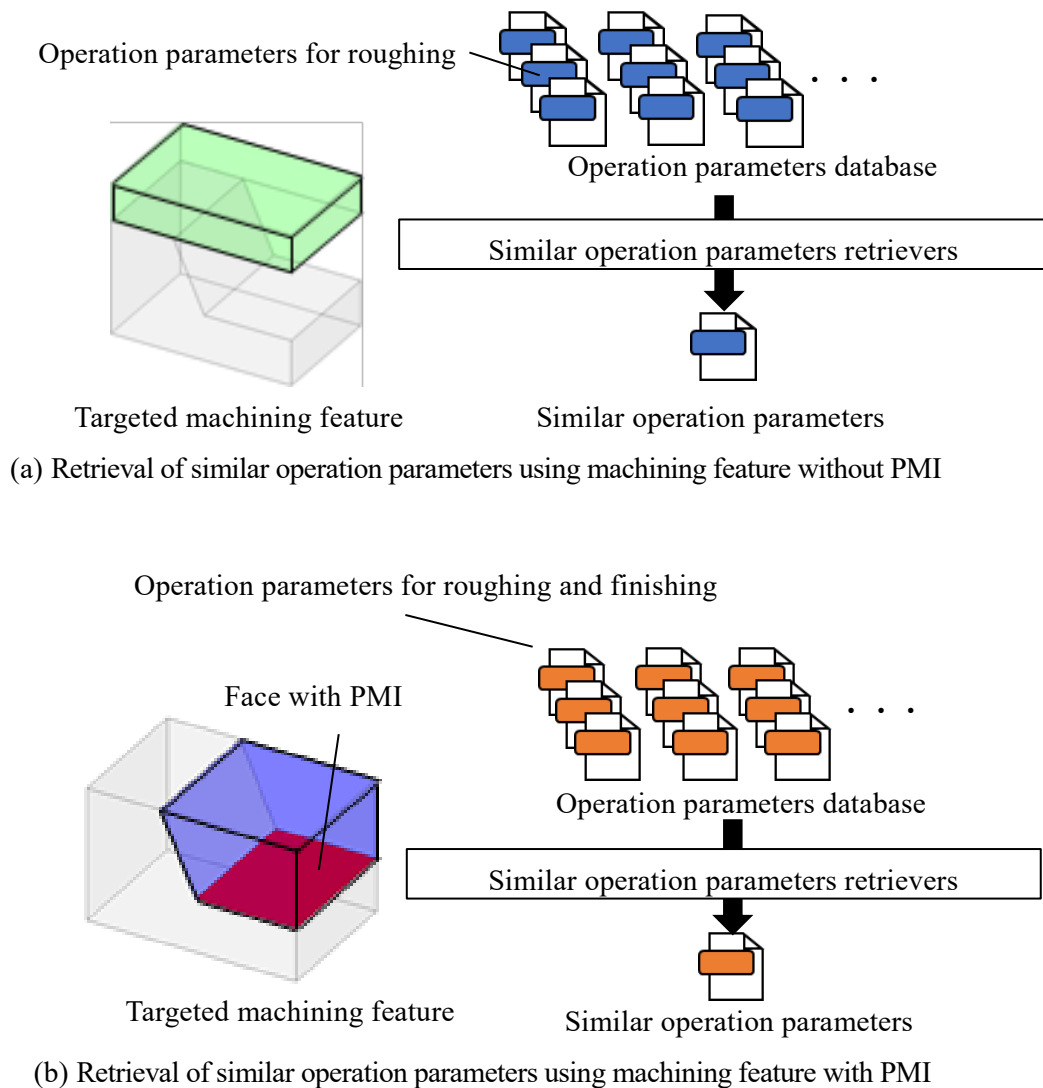


Fig.4.22 Flow of retrieval of similar operation parameters using PMI

#### 4.11 製品製造情報を反映した作業情報の推定のケーススタディ

第3章のケーススタディのパターンCで認識された加工順序1から11の荒加工の加工フィーチャに対し、二つのケースで作業情報を推定し、結果を比較する。ケースIでは、機械部品加工メーカーより提供を受けた荒加工のみの作業情報や荒加工と仕上げ加工の作業情報の477件が蓄積された作業情報データベースを用いる。ケースIIでは、477件の作業情報を、製品製造情報が受け渡されていない加工フィーチャに対しては、荒加工のみの作業情報245件が蓄積された荒加工のみの作業情報データベースを用い、製品製造情報が受け渡されている加工フィーチャに対しては、荒加工と仕上げ加工の作業情報232件が蓄積された荒加工と仕上げ加工の作業情報データベースを用いる。ワークの材料はA5052、使用工具は工具径8/14/20、刃数2の三本のエンドミルである。



表 4.15 にケースIで抽出された類似の作業情報と推定された作業情報を示す。ケースIでは、荒加工のみの作業情報や荒加工と仕上げ加工の作業情報が蓄積された作業情報データベースを用いるため、製品製造情報の有無と類似の作業情報の仕上げ加工の有無が一致していないことがわかる。表 4.16 にケースIIで抽出された類似の作業情報と推定された作業情報を示す。ケースIIでは、荒加工のみの作業情報が蓄積された荒加工のみの作業情報データベースと荒加工と仕上げ加工の作業情報が蓄積された荒加工と仕上げ加工の作業情報データベースを分けることで、製品製造情報の有無と類似の作業情報の仕上げ加工の有無が一致していることがわかる。荒加工の加工フィーチャに対して推定された作業情報のうち製品製造情報に関わる一刃あたりの送りで妥当性を確認する。加工順序 2, 5, 6, 8, 9~11 は、製品製造情報が有り、仕上げ加工前の荒加工となるため、ケースIIの一刃あたりの送りが、ケースIより小さく推定されている。また、加工順序 7 は、製品製造情報が無く、荒加工となるため、ケースIIの一刃あたりの送りが、ケースIより大きく推定されている。以上の結果から、加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用することで、仕上げ加工の有無に応じた作業情報を推定できることを確認した。

Table 4.15 Retrieved similar operation parameters and inferred operation parameters in case I

Machining sequence	With / Without PMI	Tool / Number of flutes Spindle speed [rpm] / Feed per tooth [mm/tooth] Axial depth of cut [mm] / radial depth of cut [mm] roughing / roughing and finishing	
		Retrieved similar operation parameters	Inferred operation parameters
1	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 3000 / 0.08 8 / 0.8 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 2800 / 0.11 20 / 2
2	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 5010 / 0.05 11.5 / 0.7 roughing	End mill $\phi 20 / 2$ 2805 / 0.05 16 / 1.75
3	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 3000 / 0.08 8 / 0.8 roughing and finishing	End mill $\phi 14 / 2$ 4000 / 0.18 14 / 1.4
4	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 5010 / 0.15 8 / 0.6 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 2805 / 0.13 20 / 1.5
5&6	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 5010 / 0.05 11.5 / 0.7 roughing	End mill $\phi 20 / 2$ 2805 / 0.08 16 / 1.75
7	Without PMI	End mill $\phi 4 / 4$ 6790 / 0.03 4 / 0.3 roughing and finishing	End mill $\phi 8 / 2$ 7921 / 0.08 8 / 0.6
8	With PMI	End mill $\phi 12 / 2$ 1720 / 0.08 0.5 / 9 roughing	End mill $\phi 14 / 2$ 2064 / 0.08 0.6 / 10.5
9	With PMI	End mill $\phi 16 / 4$ 750 / 0.07 7.2 / 1 roughing	End mill $\phi 20 / 2$ 600 / 0.11 9 / 1.25
10&11	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 3000 / 0.08 8 / 0.8 roughing	End mill $\phi 20 / 2$ 2800 / 0.19 20 / 2

Table 4.16 Retrieved similar operation parameters and inferred operation parameters in case II

Machining sequence	With / Without PMI	Tool / Number of flutes Spindle speed [rpm] / Feed per tooth [mm/tooth] Axial depth of cut [mm] / radial depth of cut [mm] roughing / roughing and finishing	
		Retrieved similar operation parameters	Inferred operation parameters
		1	With PMI
2	With PMI	End mill $\phi 6 / 2$ 3450 / 0.04 1 / 4.8 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 1035 / 0.04 3.3 / 16
3	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 3000 / 0.08 8 / 0.8 roughing and finishing	End mill $\phi 14 / 2$ 4000 / 0.18 14 / 1.4
4	With PMI	End mill $\phi 8 / 4$ 5010 / 0.15 20 / 0.6 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 2805 / 0.13 20 / 1.5
5&6	With PMI	End mill $\phi 6 / 2$ 3450 / 0.04 1 / 4.8 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 1035 / 0.04 3.3 / 16
7	Without PMI	End mill $\phi 16 / 4$ 750 / 0.07 7.2 / 1 roughing	End mill $\phi 8 / 2$ 1500 / 0.11 3.6 / 0.5
8	With PMI	End mill $\phi 2 / 2$ 3979 / 0.04 0.8 / 1.5 roughing and finishing	End mill $\phi 14 / 2$ 795 / 0.04 5.3 / 10.5
9	With PMI	End mill $\phi 20 / 2$ 1230 / 0.1 10 / 0.5 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 1722 / 0.08 10 / 0.5
10&11	With PMI	End mill $\phi 4 / 4$ 6790 / 0.03 4 / 0.3 roughing and finishing	End mill $\phi 20 / 2$ 3168 / 0.08 20 / 1.5

#### 4.12 推定した作業情報からの NC プログラムの自動生成

図 4.23 に推定した作業情報から NC プログラムを自動生成する流れを示す。CAM ソフトウェアの API 機能を用いて、ワークの形状、部品の目標形状、加工対象の加工フィーチャ、工具情報、推定された作業情報を CAM ソフトウェアに自動的に入力し、推定した作業情報等を用いて、CAM ソフトウェアで工具経路を自動的に導出し、NC プログラムを自動的に生成する。図 4.24 に示すように、CAM ソフトウェアで加工シミュレーションを実施し、部品の目標形状に加工されることを確認し、CAM ソフトウェアでの

NC プログラムの生成に必要なすべての作業情報が適切に推定されることを確認した。  
このように、加工フィーチャを用いた事例ベース推論により推定された作業情報で良いかを CAM ソフトウェアの加工シミュレーションで確認することで、推定された作業情報を実加工で使うことが決定される。

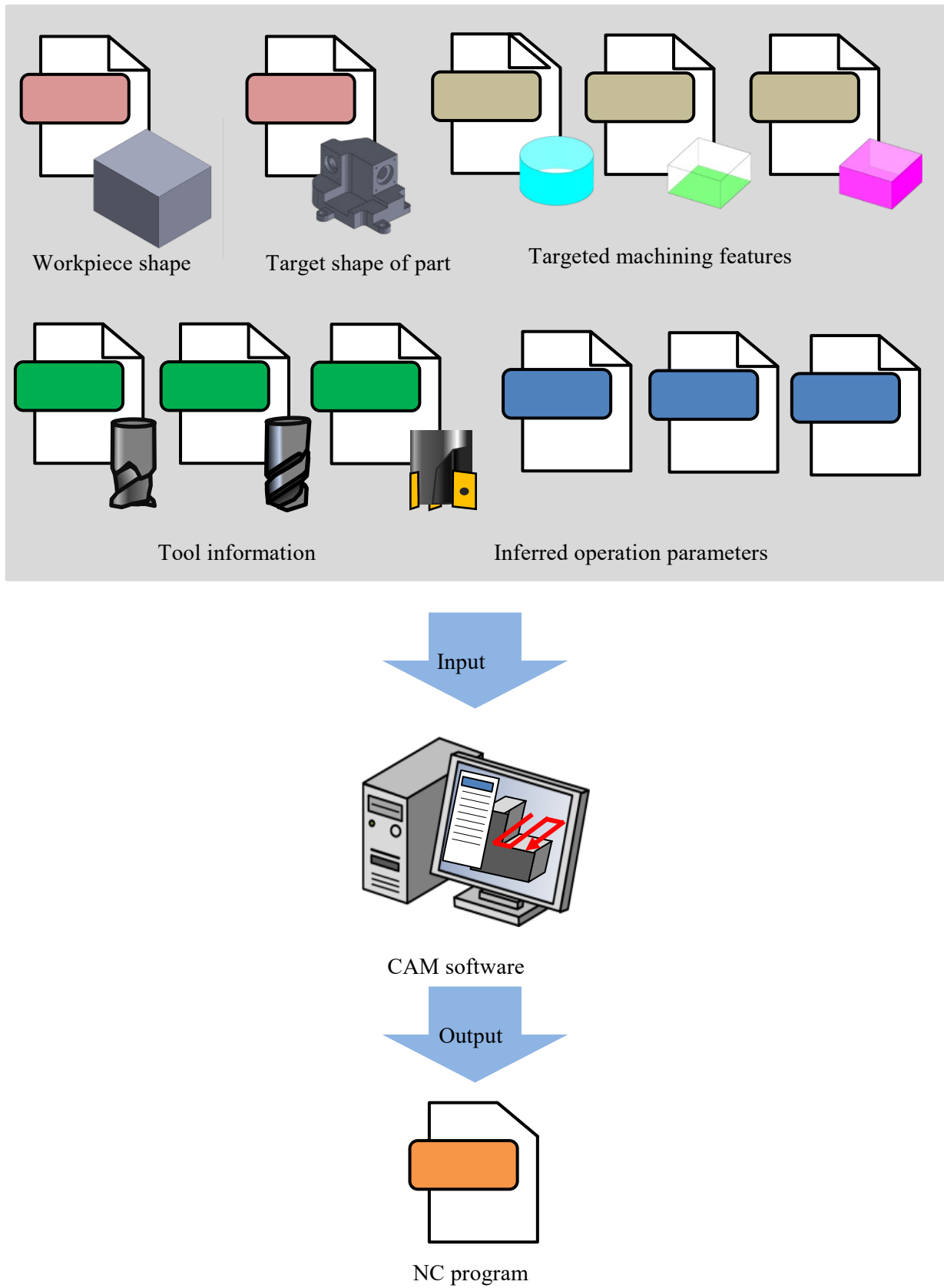


Fig.4.23 Flow of automatic NC program generation from inferred operation parameters

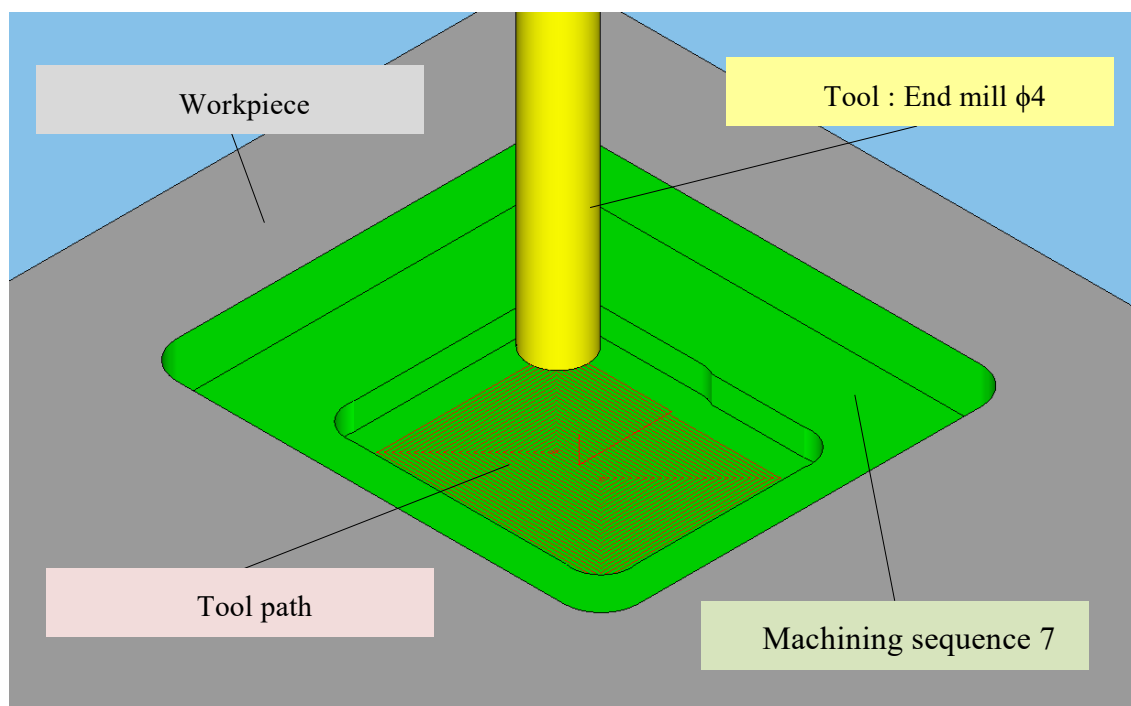


Fig.4.24 Machining 7 sequence simulation in CAM software

#### 4.13 おわりに

本章では、工程設計支援のための使用工具や切削条件といった作業情報の自動的な推定について述べた。また、推定した作業情報のCAMソフトウェアへの自動入力、CAMソフトウェアでのNCプログラムの自動生成について述べた。作業情報の推定では、加工対象の加工フィーチャを用いて、切削条件などだけでなく使用工具なども含めた作業情報を自動的に推定することで、経験の浅い作業者が、CAMソフトウェアでのNCプログラムの生成に必要な切削条件や使用工具などの作業情報を検討する負担を軽減する。また、解決する問題と類似した過去の事例を修正することで解を得る、事例ベース推論を用いて、作業情報を修正することで、作業情報を自動的に推定するため、作業情報に含まれる加工現場特有のノウハウを利用でき、推定された作業情報を、新たな作業情報として蓄積することで、蓄積された新たな作業情報も、切削条件や使用工具などの作業情報の推定に利用するために、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度が、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新される。これにより、新たな作業情報を加工現場特有の新たな加工ノウハウとして利用でき、加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進する。また、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を

検索する検索器に用いる類似度が、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新され、類似の作業情報の検索により出力される作業情報や推定される作業情報が変化することを、ケーススタディの結果から確認し、工程設計支援のための作業情報の推定により、作業情報データに蓄積された加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進できる可能性を確認した。加えて、加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用し、仕上げ加工の有無に応じた工程設計支援のための作業情報の推定について述べた。そして、実施したケーススタディの結果から、製品製造情報を反映した作業情報の推定の有用性を確認した。第5章では、認識された加工フィーチャを利用した機械学習による加工時間の推定方法を説明する。加工工程の評価指標の一つである加工時間を、CAMソフトウェアで生成されるNCプログラムから計算するには、加工工程の候補が膨大なため、相当の時間が不可欠になる。結果として、加工フィーチャの認識により算出される加工工程案の選択に時間を要する。そこで、認識された加工フィーチャを利用して、機械学習により高速に加工時間を推定する方法を考案し、ケーススタディにより、高速に高い精度で加工時間を推定できることを確認している。

## 第5章

### 工程選択に向けた

### 機械学習による加工時間の推定

#### 5.1 はじめに

1.1 節で述べたように、加工フィーチャの認識は、認識の自由度が高い一方、認識される加工フィーチャの組み合わせが複数のパターンとなるため、候補となる加工箇所や加工順序の組合せは膨大となる。また、作業情報の推定により自動的に推定される切削条件や使用工具などの作業情報を用いても、市販のCAMソフトウェアのNCプログラムの生成に時間がかかるため、膨大な加工箇所や加工順序の組合せから、所望の加工箇所や加工順序の選択に時間を要することとなる。そこで、本章では、膨大な加工箇所や加工順序の組合せからの所望の加工箇所や加工順序の選択に必要な定量的評価指標を加工時間とし、従来の加工時間の推定、機械学習を利用した加工フィーチャによる工程設計支援のための加工時間の推定について述べる。

#### 5.2 従来の加工時間の推定

従来のマシンシミュレータソフトウェアによる加工時間の推定について述べる。1.1 節で述べたように、惟村らは、加工精度、環境負荷や加工時間を指標として、認識した加工フィーチャを用いて提案された複数のパターンの加工箇所や加工順序などの加工工程から所望の加工工程の評価を提案した<sup>33)</sup>。加工時間は、アイコクアルファ株式会社製のマシンシミュレータソフトウェア G-Navi により加工時間を推定する。ただし、端面旋削の加工時間が、実際の加工と G-Navi の推定の誤差が大きいため、式(5.1)に示すように、端面旋削の加工時間  $t$  [sec] を導出する。

$$t = \frac{60}{L \times F \times N} \quad (5.1)$$

ここで、 $L$  [mm] は切削距離、 $F$  [mm/rev] は送り速度、 $N$  [rpm] は主軸回転数である。この



際、加工フィーチャの認識や作業情報の推定により切削距離、送り速度や主軸回転数が自動的に決定される。しかしながら、市販のCAMソフトウェアのNCプログラムの生成に時間がかかる。

次に、従来のCAMソフトウェアによる加工時間の推定について述べる。加工時間は、図5.1に示す市販のDP Technology社製のCAMソフトウェアESPRITにより推定することも可能である。作業者が、CAMソフトウェアに部品の目標形状を入力後、下記の工程を加工フィーチャ毎に繰り返す。

- ① CAMソフトウェアでフィーチャを作成
- ② 使用工具を決定し、CAMソフトウェアに使用工具を入力
- ③ 加工方法を決定し、CAMソフトウェアで加工方法を入力
- ④ 主軸回転数や送り速度などの切削条件を決定し、CAMソフトウェアに切削条件を入力
- ⑤ CAMソフトウェアで工具経路やNCプログラムを生成し、シミュレーションを実行
- ⑥ 図5.2に示すように、CAMソフトウェアで加工時間を確認する。

加工フィーチャ毎の作業情報の決定、CAMソフトウェアの操作、CAMソフトウェアでのNCプログラムの生成などに時間がかかる。

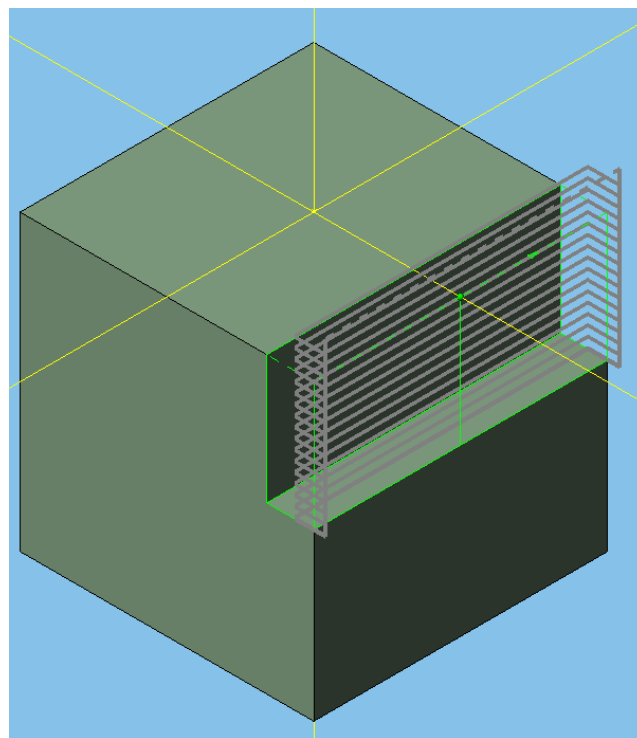


Fig.5.1 CAM software









	4	C2-10-2	00:00:00
	2	00300_C2-10-2	00:03:20
	15	D1-10.3-2	00:00:00
	3	00450_D1-10.3-2	00:06:26
	5	C3-16-4	00:00:00
	4	00680_C3-16-4	00:00:44
	31	T1A-12-3	00:00:00
	5	00685_T1A-12-3	00:00:53

Fig.5.2 Result of machining time inference of CAM software

### 5.3 機械学習を利用した加工時間の推定

従来の加工時間の推定では、作業情報の決定や市販のCAMソフトウェアのNCプログラムの生成などに時間がかかるため、膨大な加工箇所や加工順序の組合せから、所望の加工箇所や加工順序の選択に時間を要することとなる。そこで、本研究では、図5.3に示すように、過去に決定された作業情報が、加工現場特有の加工ノウハウとして作業情報データベースに蓄積されていることから、作業情報データベースに蓄積された作業情報を用いた機械学習を利用し、加工対象の加工フィーチャにより、加工時間を推定する。機械学習による加工時間の推定により、膨大な加工箇所や加工順序の候補から、所望の加工箇所や加工順序の選択に要する時間を短縮する。推定された加工時間の短い加工箇所や加工順序を膨大な候補から選択しても、加工現場特有の加工ノウハウを利用して作業情報が推定されることから、トレードオフの関係はない。膨大な候補から選択された加工箇所や加工順序を対象に作業情報を推定し、CAMソフトウェアでNCプログラムを作成する。

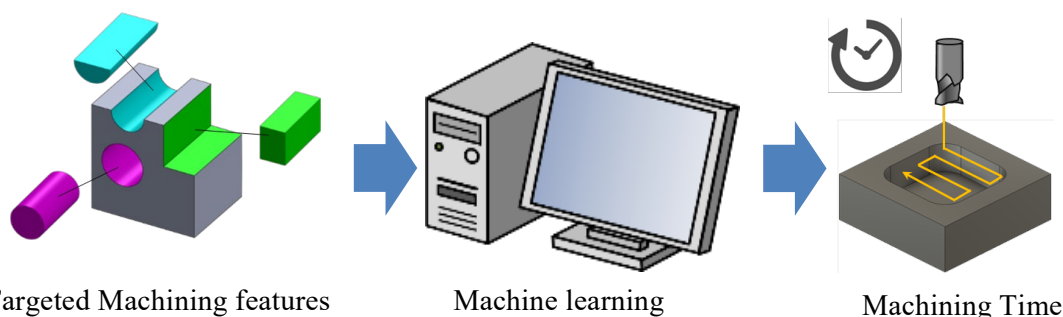


Fig.5.3 Method for machining time inference using targeted machining features

機械学習は、ロボットやコンピュータなどの機械が、経験から自動的に行動のパラメータを学習することである。機械学習には、与えられたデータと教師データから学習す

教師あり学習と、与えられたデータのみから学習する教師なし学習がある。教師あり学習は、決定木、サポートベクトルマシンやニューラルネットワークなどがあり、データの高速、高精度な分類、判別や回帰に有用である。教師なし学習は、*k-means* 法などのクラスタリングなどがあり、データのパターンやルールの発見に有用である。本研究では、教師あり学習のニューラルネットワークを使用している。

ニューラルネットワークは、人間などの脳にある神経細胞（ニューロン）で構成される神経細胞網を、コンピュータ上で模倣した神経細胞網のことであり、本物の脳を模倣した生物学的ニューラルネットワークや機械学習で使用する人工ニューラルネットワーク(ANN : Artificial Neural Network)がある。

このニューラルネットワークと重回帰分析との違いについて述べる。複数の変数を分析することで誤差の少ない予測式を作成し、一つの目的変数を予測する手法の一つに重回帰分析がある。重回帰分析は、多変量解析の一つであり、図 5.4 に示すように、入力層と出力層の二つの層で構成されている。 $n$  個の入力値  $x_i$  が出力値  $y_i$  に与える重み（偏回帰係数） $w_i$  を最小二乗法で分析して数値化し、式(5.2)に示すような、線形式で表す。

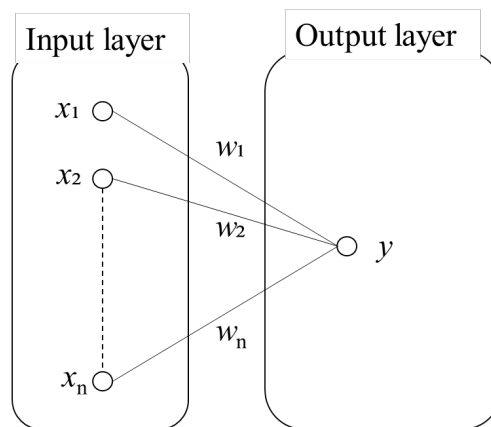


Fig.5.4 Multiple regression analysis

$$y = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) + b \quad (5.2)$$

ここで、 $b$  は切片である。これを、重回帰モデル、あるいは、線形回帰モデルという。線形とは、重み  $w$  に対して 1 次(線形)であるという意味である。例えば、式(5.3)や式(5.4)に示すようなモデルは重み  $w$  に対して線形であるため、線形回帰モデルと言えるが、式(5.5)に示すようなモデルは重み  $w$  に対して線形でないため、線形回帰モデルと言えない。

$$y = w_1x_1 + w_2x_2^2 + b \quad (5.3)$$

$$y = w_1 \sin x_1 + w_2 \cos x_2 + b \quad (5.4)$$

$$y = w_1x_1 + w_2e^{-w_2x_2} + b \quad (5.5)$$

一方、ニューラルネットワークは、図 5.5 に示すように、入力層、出力層と中間層（隠れ層）の三つの層で構成されている。

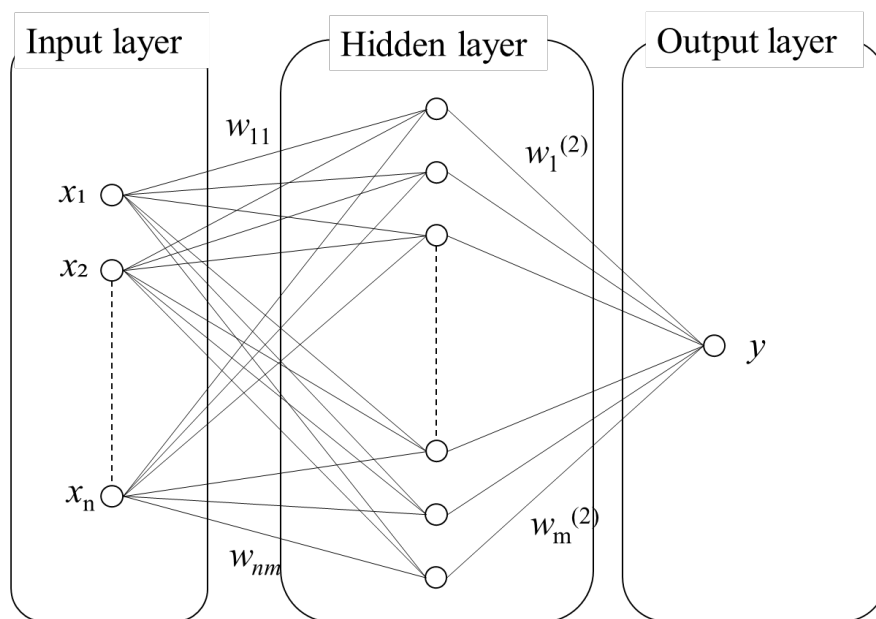


Fig.5.5 Artificial neural network

ニューラルネットワークで、入力値  $x$  に対して線形回帰する場合、式(5.6)に示すように、線形ユニット(linear unit)と呼ばれる、単なる恒等写像を用いた出力層を用意することができる。

$$y = w^{(L)}x \quad (5.6)$$

しかしながら、多くの場合、式(5.7)に示すように、非自明な活性化関数を用いて非線形

の回帰を行う。

$$y = h(w^{(L)}x) \quad (5.7)$$

具体的にどのような活性化関数を選ぶかは、問題によって設定する必要があり、例えば、中間層が1層、ニューロン数が  $m$  個の場合、式(5.8)に示すような、活性化関数が選ばれる。

$$y = h_2 \left( \sum_{j=1}^m w_j^{(2)} h_1 \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \right) \right) \quad (5.8)$$

ここで、 $h$  は活性化関数、 $w$  は重みである。

重回帰分析では線形回帰を行うのに対し、ニューラルネットワークでは多くの場合に非自明な活性化関数を用いて非線形の回帰を行うという違いがある。また、重回帰分析では回帰関数のパラメータのみを学習するのに対し、ニューラルネットワークでは回帰関数のパラメータだけでなく中間層の重みも学習するという違いもある。

ニューラルネットワークは、図 5.6 に示すように、一つのニューロンに複数のシナプスが結合された多入力単出力の形式ニューロンと呼ばれる構造となっている。

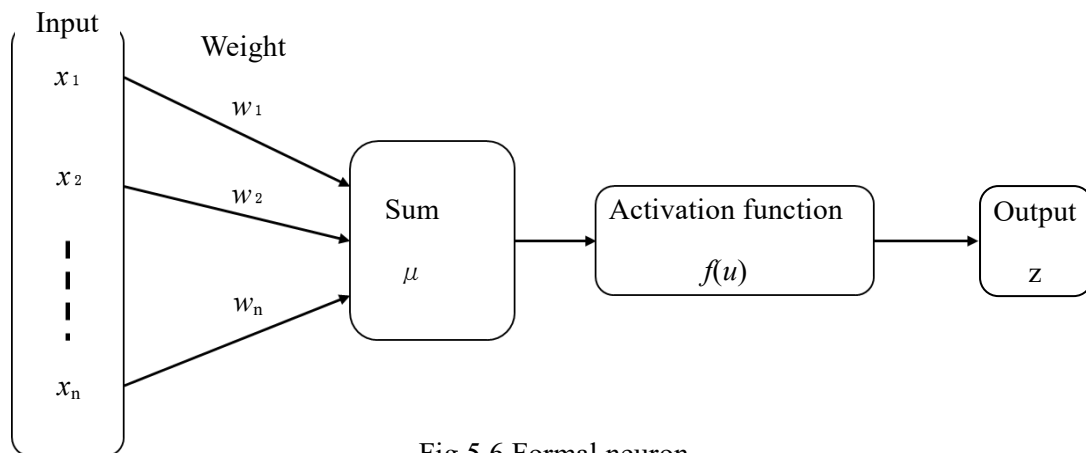


Fig.5.6 Formal neuron

ニューロンは、受け取った入力値  $x_i$  に重み  $w_i$  を掛けた合計値が  $\mu$  となる場合、式(5.9)に示すような、活性化関数  $f(\mu)$  で定義される出力値  $z$  を出力する。

$$z = f(\mu) \quad (5.9)$$

重み  $w$  は、ニューロンのつながりの強さを示し、学習により調整されることで、正解に近い出力値を得られる。活性化関数には様々な種類があり、ローゼンブラットらが提案したパーセプトロンでは、活性化関数として、式(5.10)に示すような、ステップ関数を使っている。ステップ関数は、合計値  $\mu$  が閾値  $h$  より大きい場合は 1、その他の場合は 0 を出力する。図 5.7 に  $h = 0$  の場合のステップ関数を  $\mu$  と  $z$  の関係をグラフで示す。

$$f(\mu) = \begin{cases} 1 & (\mu > h) \\ 0 & (\mu \leq h) \end{cases} \quad (5.10)$$

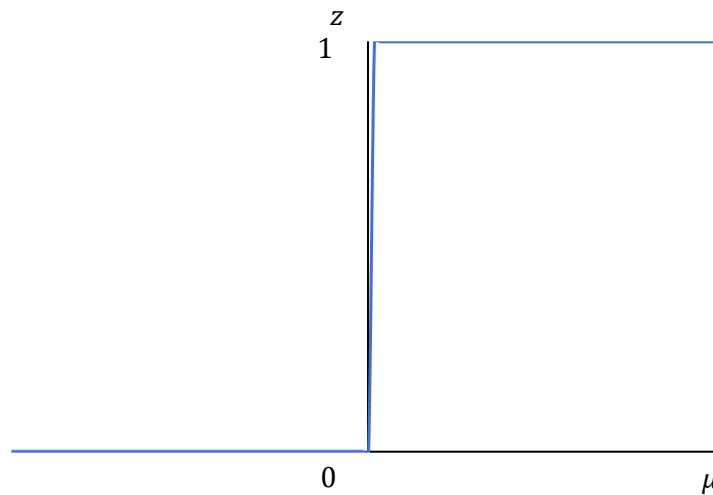


Fig.5.7 Graph of Step function

ディープラーニングは、図 5.8 に示すような、多層パーセプトロンを用いた 4 層以上の多層の人工ニューラルネットワーク (DNN: Deep neural network) による機械学習である。

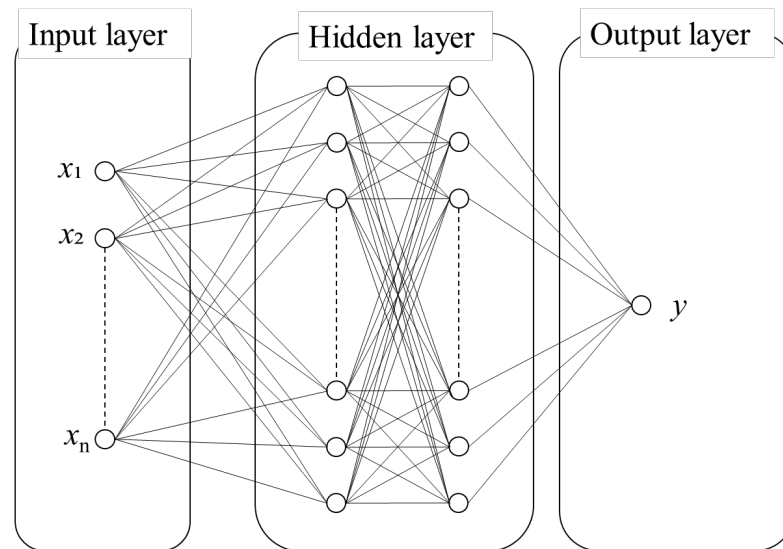


Fig.5.8 Deep neural network

ディープラーニングでは、入力値を各層に順伝播させて出力値を得ている。この出力値と教師データとの誤差を各層に逆伝播させて、誤差が小さくなるように重みを更新する誤差逆伝播法を用いることで、出力値と教師データとの誤差を小さくすることが可能となった。しかしながら、ステップ関数は、微分できないことから、ラメルハートらは、出力値と教師データとの誤差を伝播できるような微分可能な活性化関数として、式(5.11)に示すような、シグモイド関数の使用を提案した。シグモイド関数における $\mu$ と $z$ の関係を図5.9に示す。

$$f(\mu) = \frac{1}{1 + e^{-\mu}} \quad (5.11)$$

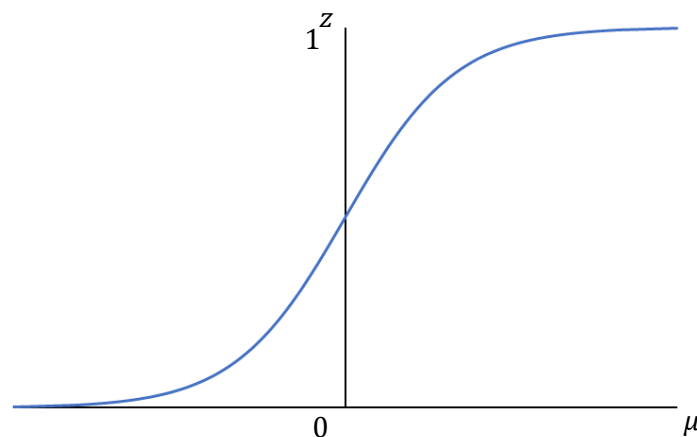


Fig.5.9 Graph of Sigmoid function

シグモイド関数の勾配が消える勾配消失問題を回避する活性化関数として、式(5.12)に示すような、双曲線正接関数がある。双曲線正接関数における $\mu$ と $z$ の関係を図 5.10 に示す。

$$f(\mu) = \tanh(\mu) \quad (5.12)$$

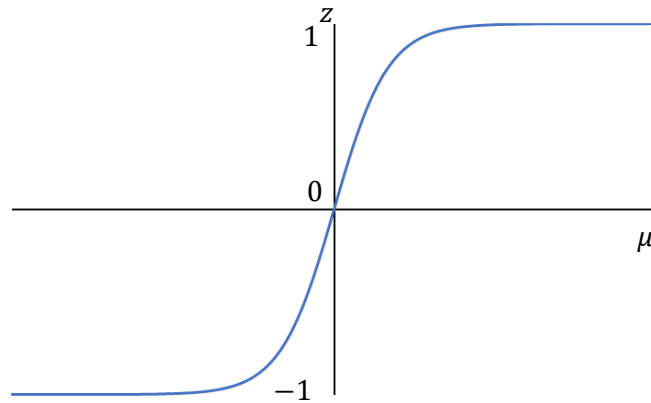


Fig.5.10 Graph of Hyperbolic tangent function

$f(\mu)$ の範囲が、シグモイド関数の場合、 $0 \leq f(\mu) \leq 1$ である一方、双曲線正接関数の場合、 $-1 \leq f(\mu) \leq 1$ となる。双曲線正接関数により、勾配が消失しにくくなるが、関数の値が大きくなる場合に勾配が消える問題は回避できない。そこで、近年では、勾配が消失しない活性化関数として、式(5.13)に示すような、正規化線形ユニット(ReLU : Rectified linear unit)が用いられている。正規化線形ユニットにおける $\mu$ と $z$ の関係を図 5.11 に示す。

$$f(\mu) = \max(0, \mu) \quad (5.13)$$



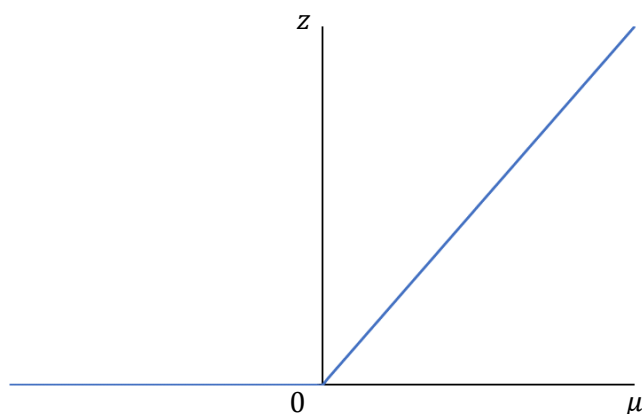


Fig.5.11 Graph of Rectified linear unit

ReLU は、 $\mu$ が 0 以下であれば 0 を出力し、0 以上の場合は線形に $\mu$ の値を出力する。

機械学習の入力について述べる。加工フィーチャの種類は、表 2.1(A)~(L)に示す 12 種類に異なる整数を割り当てる。加工フィーチャの寸法は、図 5.12 に示すような幅、奥行、高さを用いる。ワークの材料は、アルミ合金、鋳鉄、炭素鋼やステンレス鋼の 4 種類に異なる整数を割り当てる。ただし、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法、ワークの材料の値をそのままニューラルネットワークに入力すると、入力値が重みに影響を与えて、精度の良い学習ができない。そこで、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法、ワークの材料の各値の最大値を 1 として、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法、ワークの材料の各値の入力値を 0~1 の連続値に正規化する。また、加工時間は、図 5.2 に示すように CAM ソフトウェアにより算出した時間を用いる。これらの入力を教師データとして、機械学習を行う。

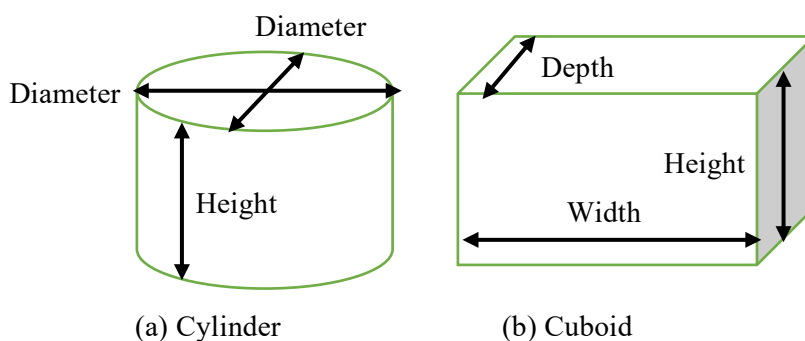


Fig.5.12 Machining feature dimensions

本研究では、図 5.13 に示すような、中間層は 4 層、ニューロン数は 1 層目から順に 14, 647, 451, 606 のニューラルネットワークを用いた。

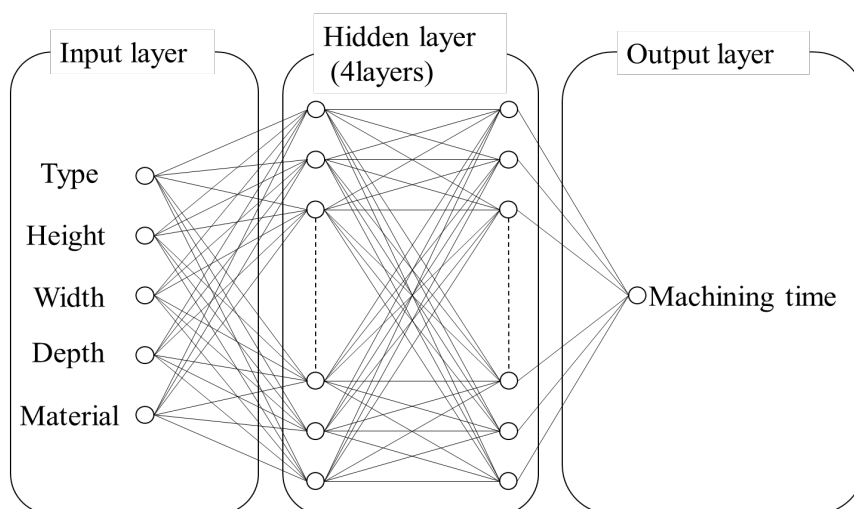


Fig.5.13 Neural network in this study

また、本研究では、Google 社製の機械学習ライブラリ TensorFlow と Chainer を利用し、活性化関数には加工時間が正数であることから 0 以下を考慮しない ReLU 関数、損失関数には回帰問題において最もメジャーな平均二乗誤差、最適化手法には確率的勾配降下法 (Stochastic Gradient Descent) に速度の減衰 momentum を付け足すことで SDG より学習が速く進む MomentumSGD を用いる。

#### 5.4 ケーススタディ

訓練データ：テストデータ：検証データの割合は、奥田らは、8:1:1 でランダムに選出<sup>45)</sup>しているが、この割合は一概に正解はないため、用いるデータに応じて決定し、本ケーススタディでは、機械部品加工メーカーより提供を受け、作業情報データベースに蓄積された 344 件の作業情報から、図 5.14 に示すように、加工フィーチャの種類やワークの材料が異なるように 4 件の作業情報を評価に使うテストデータとしてランダムに選出した。加工時間と関連するワークの材料 4 種類のうち 3 種類が、4 件のテストデータに含まれている。CAM ソフトウェアにより算出した加工時間を最下段に示す。

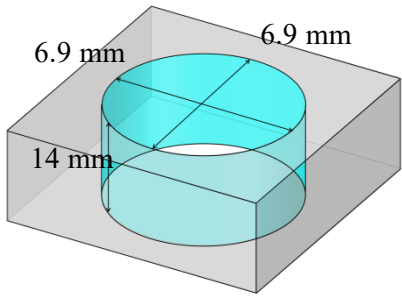
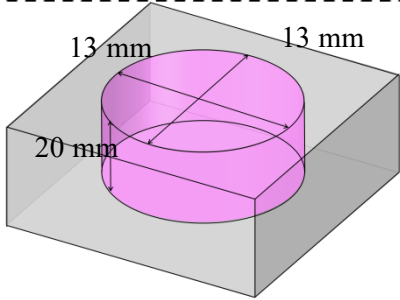
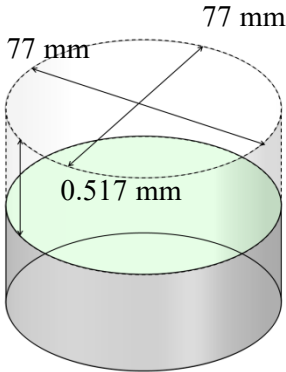
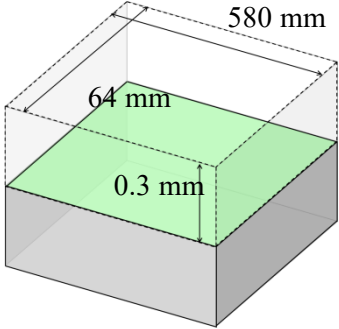
No. 1	No. 2
	
Through hole   Aluminum Alloy	Blind hole   Cast iron
92 seconds	49 seconds
No. 3	No. 4
	
Face Cylinder   Cast iron	Face Prismatic   Stainless steel
690 seconds	81 seconds

Fig.5.14 Test data

また、4 件の作業情報を学習回数などの調整に使う検証データとして選出し、残り 336 件の作業情報を学習用データとして学習をした。学習データを用いて学習を繰り返す回数である学習回数は 2000 回、学習データを分けたサブセットに含まれる学習データの数であるバッチサイズは 200、1 回の学習での重み等の調整値である学習率は 0.001 とした。学習の結果である学習曲線を図 5.15 に示す。横軸は学習回数 Number of epochs、縦軸は損失値 Loss である。この学習曲線より、学習を重ねるにつれて損失値が収束していることがわかる。

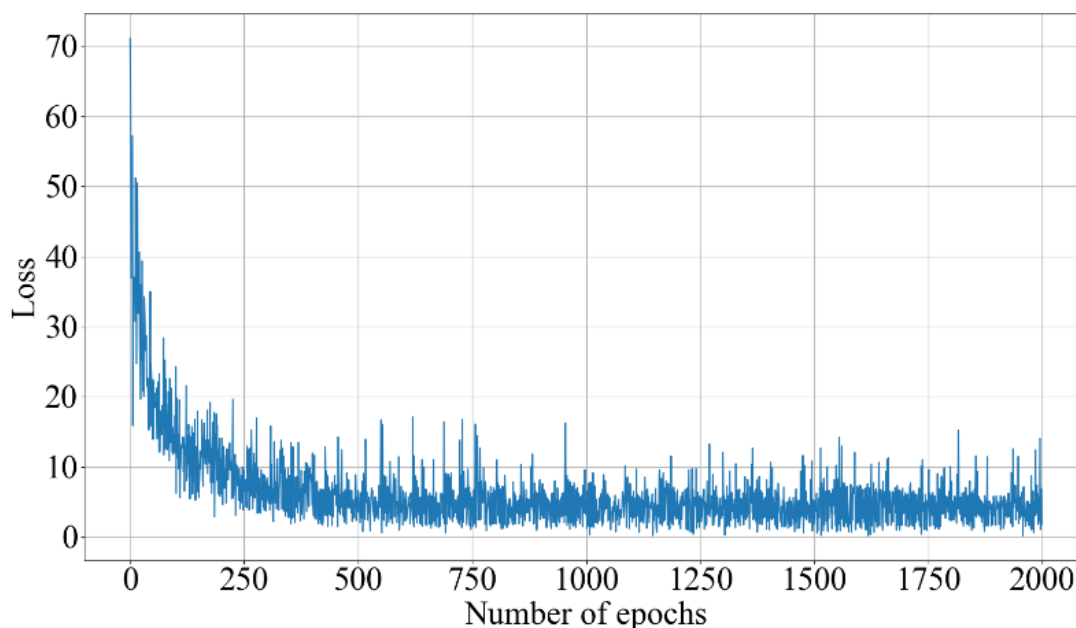


Fig.5.15 learning curve

前述のように学習したニューラルネットワークにより，図 5.14 に示した No.1～4 のテストデータの加工時間を推定した．表 5.1 に，テストデータ No.1～4 の，学習したニューラルネットワークにより推定した加工時間の推定値 $\hat{y}$ ，CAM ソフトウェアにより算出した加工時間の実測値 $y$ を示す．また，式(5.14)に示すように，相対誤差の余事象を用いて精度 *Accuracy* を導出した．

$$Accuracy = 100 \times \left( 1 - \frac{|y - \hat{y}|}{y} \right) \quad (5.14)$$

Table 5.1 Result of machining time inference

No.	Inferred machining time $\hat{y}$	Actual machining time $y$	<i>Accuracy</i>
1	00:01:20.0	00:01:32.0	86.96 %
2	00:00:48.9	00:00:49.0	99.75 %
3	00:11:28.2	00:11:30.0	99.73 %
4	00:01:35.4	00:01:21.0	82.23 %

表 5.1 より，テスト No.1～4 の精度は，最高 99.75%，最低 82.23%，平均 92.17%と高い精度で加工時間を推定できることを確認した．

CAM ソフトウェアによる加工時間の推定では、5.2 節で述べたように、CAM ソフトウェアで工具経路や NC プログラムを生成するために、加工フィーチャ毎に①から⑥の工程を繰り返す。工程②の使用工具の決定、工程③の加工方法、工程④の作業情報の決定が既に行われていたものの、加工時間の推定のための①から⑥の工程にテストデータ 1 件につき 5 分程かかり、テストデータ 4 件の加工時間の推定にかかった時間は、20 分程であった。一方、加工フィーチャを利用した機械学習による加工時間の推定では、加工時間の推定の前準備として、336 件の作業情報の機械学習に 30 秒程かかるが、その後は、ニューラルネットワークにテストデータを入力する工程のみであり、テストデータ 4 件の加工時間の推定にかかった時間は、40 秒程であった。以上より、CAM ソフトウェア等による従来の加工時間の推定より、機械学習を利用した加工フィーチャによる工程設計支援のための加工時間の推定の方が、はるかに高速に加工時間を推定できることを確認した。

## 5.5 おわりに

本章では、従来の加工時間の推定、機械学習を利用した加工フィーチャによる工程設計支援のための加工時間の推定について述べた。また、ケーススタディを実施し、機械学習を利用した加工フィーチャによる工程設計支援のための加工時間の推定によって推定された加工時間の精度が高く、従来の加工時間の推定よりもはるかに高速に加工時間を推定でき、工程設計の際に、膨大な加工箇所や加工順序の組合せから、所望の加工箇所や加工順序の選択に要する時間を短縮できる可能性を確認した。第 6 章では各章で得られた結果についてまとめを述べる。

---

---

## 第6章

### 結論

---

---

本研究では、製品製造情報を利用した工程設計支援システムの開発に関する研究について述べた。

- (1) 製品製造情報を利用した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識について述べた。従来の荒加工用の加工フィーチャに加えて、仕上げ加工用の加工フィーチャを新たに導入した。また、部品の目標形状に指示された製品製造情報を除去領域の参照面や加工プリミティブに受け渡すことで、製品製造情報を一様に扱えるようにした。また、加工プリミティブの製品製造情報を参照して、荒加工用の加工フィーチャや仕上げ加工用の加工フィーチャの認識を可能とした。
- (2) 使用工具や切削条件といった作業情報の自動的な推定、推定した作業情報のCAMソフトウェアへの自動入力、CAMソフトウェアでのNCプログラムの自動生成について述べた。また、加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用し、仕上げ加工の有無に応じた作業情報の推定について述べた。
- (3) 機械学習を利用した加工フィーチャによる加工時間の推定について述べた。

製品製造情報を利用した工程設計支援システムの開発に関する研究で得られた結果や考察より、次のような知見を得た。

- (1) 提案した製品製造情報を利用した荒加工用や仕上げ加工用の加工フィーチャの認識により、製品製造情報を反映した仕上げ加工を含む工程設計を行えること、認識した加工フィーチャを用いて、加工箇所や加工順序といった作業情報が自動的に提案されることを示した。
- (2) 加工対象の加工フィーチャを用いて、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索し、事例ベース推論を用いて、作業情報を修正することで、CAMソフトウェアでのNCプログラムの生成に必要な切削条件や使用工具などの作業情報を自動的に推定できることを示した。
- (3) 作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度が、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新

され、類似の作業情報の検索により出力される作業情報や推定される作業情報が変化することを確認し、作業情報データに蓄積された加工現場特有のノウハウの進化や加工工程の標準化を推進できる可能性を示した。

- (4) 加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用して作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索することで、仕上げ加工の有無に応じた作業情報を推定できることを示した。
- (5) 機械学習を利用した加工フィーチャによる加工時間の推定によって推定された加工時間の精度が高く、従来の加工時間の推定よりもはるかに高速に加工時間を推定でき、工程設計の際に、膨大な加工箇所や加工順序の組合せから、所望の加工箇所や加工順序の選択に要する時間を短縮できる可能性を示した。
- (6) 従来のCAMソフトウェアでは、工程設計とCAMソフトウェアへの手入力に、加工箇所1箇所につき5分、加工箇所が14箇所の部品の目標形状の場合70分を要する一方、工程設計支援システムにより、加工現場特有のノウハウを利用した工程設計を支援し、また、CAMソフトウェアへの手入力の時間的負担が低減され、準備時間が3分ほどに短縮することを示した。

第1章では、工程設計支援システムの必要性、研究動向、課題、製品製造情報の利用の必要性について述べた。

第2章では、工程設計支援のための加工フィーチャの認識や所望の加工工程を選択するための加工工程の評価指標について述べた。

第3章では、製品製造情報を反映した加工フィーチャの認識について述べた。

第4章では、加工フィーチャを用いた事例ベース推論による作業情報の推定について述べた。

第5章では、機械学習を利用した加工フィーチャによる加工時間の推定について述べた。

## 今後の展望

本研究では、製品製造情報を利用した工程設計支援システムの開発に関して研究した。システムの実用性を高めるために取り組むべきと考えられる課題について述べる。

- (1) 作業情報の推定を提案したが、位置決め5軸を対象としており、近年の製造業では、同時5軸切削加工が盛んに行われるようになってきたことから、同時5軸切削加工を対象にする作業情報の推定が求められる。
- (2) 提案した作業情報の推定は、作業情報が蓄積された作業情報データベースから類似の作業情報を検索する検索器に用いる類似度を、作業情報データベースに蓄積された作業情報を基に自動で更新するが、過去の作業情報が作業情報データベースに蓄積されたままになることにより、最新の工作機械や工具等に対して推定される作業情報が不適切になる恐れがあるため、最新の工作機械や工具等を優先した作業情報の推定が求められる。また、過去の良い作業情報が作業情報データベースに蓄積されていることが前提となることから、作業情報データベースに蓄積される過去の作業情報の整理の支援が求められる。加えて、作業情報データベースに蓄積された類似度の高い作業情報を基にした内挿は根拠があるが、類似度の低い作業情報を基にした外挿は根拠が弱いため、工具カタログや解析などから仮の作業情報を作業情報データベースに蓄積し、作業情報の推定時に補正するなどの対応が求められる。
- (3) 加工対象の加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用する作業情報の推定を提案したが、製品製造情報の内容の考慮が十分ではない。製品製造情報の表面粗さ等を満たす加工を行えるよう、仕上げ加工を含む適切な加工条件などの作業情報の推定、実際の加工での表面粗さなどの評価が求められる。
- (4) 機械学習を利用した加工フィーチャによる加工時間の推定を提案したが、荒加工や仕上げ加工の考慮が十分でない。加工フィーチャに受け渡された製品製造情報を利用して、仕上げ加工の有無に応じた加工時間の推定が求められる。
- (5) 提案した機械学習の評価は加工時間と関連するワークの材料に注目したが、機械学習の入力は、ワークの材料だけでなく、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法もあるため、ワークの材料だけでは評価が十分ではないため、より多くの作業情報を収集することで、より高精度のネットワークを構築し、加工フィーチャの種類などにも注目した評価が求められる。





## 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) 竹田陽子, 青島矢一, 延岡健太郎, 林采成, 元時太, 設計 3 次元化が製品開発プロセスと成果に及ぼす影響に関する日本・中国・韓国の比較調査, 技術マネジメント研究, Vol. 8, (2009), pp. 53-61.
- 3) Ricci, F., Bedolla, S. J., Gomez, M. J. and Chiabert, P., PMI: a PLM Approach for the Management of Geometrical and Dimensional Controls in Modern Industries, Computer-Aided Design and Applications, Vol. 11, (2014), pp. S36-S43.
- 4) Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. and Kheddouci, F., Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry, Computers in Industry, Vol. 61, Issue. 5, (2010), pp. 497-508.
- 5) Fang, Z, F., Li, Z., Arokiam, A. and Gorman, T., Closed Loop PMI Driven Dimensional Quality Lifecycle Management Approach for Smart Manufacturing System, Procedia CIRP, Vol. 56, (2016), pp. 614-619.
- 6) Cicconi, P., Raffaelli, R. and Germani, M., An approach to support model based definition by PMI annotations, Computer-Aided Design and Applications, Vol. 14, (2017), pp. 526-534.
- 7) Urbasa, U., Vrabiča, R. and Vukašinović, N., Displaying Product Manufacturing Information in Augmented Reality for Inspection, Procedia CIRP, Vol. 81, (2019), pp. 832-837.
- 8) Peng, Z., Huang, M., Zhong, Y., Chen, L. and Liu, G., A new method for interoperability and conformance checking of product manufacturing information, Computers & Electrical Engineering, Vol. 85, (2020), 106650.
- 9) 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.
- 10) 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.

- 11) 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.
- 12) JIS B 0060-2 : 2015 デジタル製品技術文書情報一第 2 部 : 用語
- 13) 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, pp.165-170, (2006).
- 14) Shi, Y., Zhang, Y., Xia, K., and Harik, R., A Critical Review of Feature Recognition Techniques, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 17, No. 5 (2020), pp. 861-899.
- 15) Fu, W., Eftekharian, A.A., and Campbell, M. I., Automated Manufacturing Planning Approach Based on Volume Decomposition and Graph-Grammars, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 13, No. 2 (2013), 021010.
- 16) 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/jamdsm.14-00095.
- 17) 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.
- 18) Y.S. Kim, E. Wang, "Recognition of machining features for cast then machined parts", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, Issue 1, pp.71-87, (2002).
- 19) Sakurai, H., "Volume decomposition and feature recognition: part 1-polyhedral objects", *Computer-Aided Design*, Volume 27, Issue 11, pp.833-843 (1995).
- 20) 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.
- 21) 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 (2006), pp.397-400.
- 22) Li, Y., Ding, Y., Mou, W. and Guo, H., Feature recognition technology for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, Issue. 2, (2010), pp. 271-278.
- 23) Rahmani, K. and Arezoo, B., A hybrid hint-based and graph-based framework for

- recognition of interacting milling features, *Computers in Industry*, Vol. 58, Issue. 4, (2007), pp. 304-312.
- 24) J. Zhu, M. Kato, T. Tanaka, H. Yoshioka, and Y. Saito, “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, Paper No. 15-00296, (2015).
- 25) 西田 勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 加工制約条件を考慮したエンドミル加工用工程設計支援システムの提案, *システム制御情報学会論文誌*, 30 巻, 3 号, pp. 81-86, (2017).
- 26) Sunil, B. V. and Pande, S, Automatic recognition of machining features using artificial neural networks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 9, (2009), pp. 931-947.
- 27) Jian, C., Li, M., Qiu, K. and Zhang, M., An improved NBA-based STEP design intention feature recognition. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 88, (2018), pp. 357-362.
- 28) Mokhtar, A. and Xu, X., Machining precedence of 2½D interacting features in a feature-based data model, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 22, (2011), pp. 145-161.
- 29) Liu, X., Li, Y. and Wang, L., Combining dynamic machining feature with function blocks for adaptive machining, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 13, Issue. 2, (2016), pp. 828-841.
- 30) 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), 15-00108.
- 31) 井上友貴, 中本圭一, 複雑部品の切削加工に向けた工程設計支援システムのための加工フィーチャ認識手法の提案, *日本機械学会論文集*, Vol 83, No. 850 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00574.
- 32) 井上友貴, 中本圭一, 設計情報を反映するための加工フィーチャ認識手法の提案, *日本機械学会論文集*, Vol. 86, No. 882, (2020), DOI: 10.1299/transjsme.19-00414.
- 33) K. Koremura, K. Nakamoto, “A Study on process evaluation indexes for a computer aided process planning system”, *Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, CD-ROM 0302, (2015).
- 34) Iqbal, A., He, N., Li, L., Dar, N., A Fuzzy Expert System for Optimizing Parameters and Predicting Performance Measures in Hard-Milling Process, *Expert Systems with*

- Applications, Vol. 32, No. 4 (2007), pp. 1020-1027.
- 35) 佐藤雄磨, 森重功一, XML により記述された加工情報データベースを利用した作業設計支援システムの開発, 精密工学会誌, Vol. 74, No. 1 (2008), pp. 92-96.
  - 36) 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 工具カタログデータにデータマイニング手法を応用した粗加工用切削条件決定支援, 砥粒加工学会誌, Vol. 56, No. 12 (2012), pp. 824-829.
  - 37) 椎木祐策, Isnaini, M.M., 佐藤隆太, 白瀬敬一, 加工事例を再利用して NC プログラムを作成する機械加工用作業設計システム, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 832 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00280.
  - 38) Nishida, I. and Shirase, K., Automatic Determination of Cutting Conditions for NC Program Generation by Reusing Machining Case Data Based on Geometric Properties of Removal Volume, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 12, No. 2 (2018), DOI:10.1299/jamdsm.18-00237.
  - 39) 長野竜也, 白瀬敬一, 若松栄史, 荒井栄司, 事例ベース推論に基づく切削条件推論システム, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 9 (2001), pp. 1485-1489.
  - 40) 小林重信, 事例ベース推論の現状と展望, 人工知能学会誌, Vol.7, No.4 (1992), pp.559-566.
  - 41) Inoue. Y., Koremura. K., Nakamoto. K., Proposal of a CAPP System for Multi-tasking Machine Tools Dealing with Complicated Machining Operations, Proceedings of the 16th International Conference of Precision Engineering (ICPE2016), USB B307-8095 (2016-11).
  - 42) 相馬淳人, 3次元 CAD データ有効活用のためのデータ連携の現状と今後の方向性, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 3, (2015), pp. 216-219.
  - 43) 石岡恒憲, x-means 法改良の一提案 -k-means 法の逐次繰り返しとクラスターの再併合-, 計算機統計学, Vol. 18, No. 1 (2006), pp. 3-13.
  - 44) 秋藤俊介, 辻洋, バージョン空間法を応用した類似事例の検索と索引の更新方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 1 (1995), pp. 41-50.
  - 45) 奥野萌莉, 出口弘, 深層学習による樹木の葉の分類, 第 83 回全国大会講演論文集 2021 (1), pp.129-130

## 謝辞

はじめに、研究の推進にあたり、ご支援やご指導くださったすべての方々に深く感謝申し上げます。

研究の推進にあたり、中本圭一教授と笹原弘之教授には大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。毛利宏教授、鎌田崇義教授、夏亘教授には、ご多忙のところ、審査をお引き受け頂き、深く感謝申し上げます。

中本圭一教授には、大学院入学から4年半大変お世話になりました。研究に関する多くの貴重なご支援やご指導を頂き、研究をより加速することができました。また、お忙しい中、何度も論文を添削頂き、深く感謝申し上げます。加えて、学界で発表する機会を設けて頂き、深く感謝申し上げます。COVID-19 流行に伴うリモートでの発表は、貴重な経験となりました。学会での発表や学内での発表の機会は、学界の知己を得て視野を広げることができました。深く感謝申し上げます。

笹原弘之教授には、大学院セミナーで、研究を見て頂き、研究に関する多くの貴重なご指導を頂いたことは、研究を推進する中で大変有意義な機会となりました。深く感謝申し上げます。

中本研究室 OB の井上友貴氏、五十嵐岳史氏、塚本涼氏、渡辺雄斗氏、川上響生氏には研究の内容についてご相談をさせて頂いた機会が多く、深く感謝申し上げます。

中本研究室の皆様とは、COVID-19 流行のため、あまり交流できなかったことは残念ですが、益々のご活躍をお祈りしております。

アイコクアルファ株式会社には、大学院に通うことを許可頂き、深く感謝申し上げます。

幾多のご支援やご指導頂きましたが、ご氏名を記載できなかった皆様に、失礼をお詫びするとともに、深く感謝申し上げます。

最後に、業務に加えて、研究に専念できるよう、支えて頂いた家族に、心より感謝しております。