加工フィーチャを用いた事例ベース推論による 作業設計支援システムの開発に関する研究*

浅野 哲也** 塚本 涼*** 中本 圭一†

Study on Development of an Operation Planning System Based on Case-Based Reasoning Using Machining Features

Tetsuya ASANO, Ryo TSUKAMOTO and Keiichi NAKAMOTO

High-speed and high-precision machine tools developed recently have contributed to shorten machining time in parts machining. However, it consumes long time to determine operation parameters such as machining area, machining method, cutting tool and cutting conditions, and they deeply depend on operators' knowledge and experience. Thus, the preparation time before parts machining remains as a critical issue to be solved to achieve high-mix low-volume production. Therefore, in order to improve the efficiency of process planning, this study proposes an operation planning system to derive operation parameters based on case-based reasoning using recognized machining features. By using information of machining features, it becomes possible to widely deal with operation parameters such as not only cutting tool and cutting conditions, but also tool approaching and retracting patterns that are required to be input in CAM system. Additionally, since machining cases are added to a case database sequentially, the rules for case retrieval are automatically adjusted to utilize the past machining cases effectively in this system. From the result of a case study, it is confirmed that the developed system has a possibility to derive proper operation parameters in parts machining.

Key words: operation planning system, case-based reasoning, machining feature, CAM system, parts machining

1. 結 論

製造業の生産形態は、大量生産から多品種少量生産へと移行し、近年では多様な製品を迅速かつ効率的に生産する必要性が高まっている。これに伴い、製品形状や製品製造情報から加工工程を計画する工程設計、詳細な実施内容を計画する作業設計など、加工工程を開始するまでの準備時間を含めた効率化が望ま

れている。機械加工においては、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 CAM ソフトウェアが導入され、加工工程自体の効率化は進んでいる。しかしながら、加工箇所、加工方法、使用工具や切削条件などの CAM ソフトウェアに必要な情報は、作業者の知識や経験に基づいて決定されることが多く標準化が進んでいない。さらに、加工現場特有のノウハウにも依存するため、加工経験の浅い作業者にとっては大きな負担となる。そこで、加工工程の準備時間を短縮するために、工程設計や作業設計を支援するシステムの開発が求められている。

工程設計支援システムの開発に向けて、目標形状や除去領域から加工フィーチャと呼ばれる特徴形状を認識する方法が盛んに研究されており^{1)~4)}、著者らも目標形状と接する創成面の数や種類などにより分類した新たな加工フィーチャを提案している⁵⁾。この加工フィーチャはワーク形状と目標形状の差である除去領域を複数通りに分割した加工プリミティブごとに、加工順序を決定しながら認識され、図 1 に部品加工を想定したケーススタディにおいて加工フィーチャを認識した例を示す⁶⁾。しかし、その後の作業設計では、認識された各加工フィーチャの加工作業に関わる情報（以下、作業情報）を独自に考案したルールに基づいて決定しており、妥当性の検証が不十分であった。

一方、作業設計の支援に向けた研究も数多く存在し^{7)~9)}、本研究と同様に、認識された加工フィーチャと類似した加工フィーチャの加工作業の事例（以下、加工事例）を利用して、NC プログラムを自動生成した取組みもある^{10) 11)}。しかし、認識された加工フィーチャに応じた工具経路、加工領域や切削条件の修正は作業者に委ねられており、更なる自動化が求められる。また、本研究でも採用した事例ベース推論により工具回転速度、切削速度、送り速度や切込み量などの切削条件を推定した取組みもあるが¹²⁾、NC プログラムの生成には切削条件のみでは不十分であり、加工方法や使用工具などの作業情報の推定が欠かせない。

Fig. 1 Machining features recognition in the author's previous study⁶⁾

* 原稿受付 令和 2 年 12 月 21 日

掲載決定 令和 3 年 2 月 26 日

** アイコアルファ株式会社（愛知県稲沢市祖父江町森上本郷 11-4-1）

*** 東京農工大学大学院（東京都小金井市中町 2-24-16）

† 正 会 員 東京農工大学大学院

Fig. 2 Flow of developed operation planning system based on case-based reasoning in this study

Fig. 3 Description scheme for machining case in the developed system

そこで本研究では、事例ベース推論を利用して、CAM ソフトウェアで NC プログラムを生成するために必要な全ての作業情報を推定する作業設計支援システムを開発し、加工準備時間の短縮を目指す。このため、割出し 5 軸制御加工も取り扱える先行研究¹³⁾で認識された加工フィーチャを利用することで、切削条件だけでなく加工方法や使用工具なども含めた作業情報を推定し、工程設計から作業設計を経た NC プログラムの生成までを自動化することにより、加工経験の浅い作業者の負担軽減を図る。また、加工事例が随時蓄積される実際の加工現場に向けて、データベース内の事例に従って事例検索のルールが自動で更新される仕組みも導入し、加工事例に含まれる加工現場独自のノウハウの継承とその進化を、推定する作業情報へと反映できるようにする。本システムの有用性は、部品加工を想定したケーススタディにより検証する。

2. 作業設計支援システム

2.1 システムの概要

開発した事例ベース推論による作業設計支援システムの流れを図 2 に示す。本システムでは、認識された加工フィーチャに対して、過去の加工事例を蓄積したデータベースから類似の事例を検索し、抽出した事例を加工対象に応じて修正して、推定された作業情報を CAM ソフトウェアへ直接入力できる形式で出力する。この作業情報は、加工事例として新たにデータベースへ追加することも可能である。

本研究で用いる加工事例には、図 3 のように加工フィーチャの種類・寸法とワークの材料に加えて CAM ソフトウェアで NC

Fig. 4 Machining methods considered in this study

Fig. 5 Cluster extraction for case retrieval by using the x-means method

プログラムを生成するために必要な作業情報が含まれており、加工結果が良好な加工事例のみを取り扱う。作業情報は、工具回転速度、工具送り速度や切込み量などの切削条件、加工方法、ツーリング、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、工具経路パターンと工具経路方向であり、CAM ソフトウェアの操作履歴としてファイルに保存されている。また、ツーリングは工具の種類、材料、直径や刃数、ホルダなどを含んでおり、別ファイルにまとめられている。本研究で対象とする加工フィーチャは、4 種類の円柱形状と 8 種類の直方体形状の 12 種類、これらに穴が付加された 12 種類および面取りなどの微小形状 1 種類の合計 25 種類である⁹⁾。加工方法は割出し 5 軸制御加工における図 4 の 5 種類を想定しており、本研究で対象とした 25 種類の加工フィーチャはいずれかの方法で加工できる。

なお、本研究では CAM ソフトウェアとして、ESPRIT (DP テクノロジー) を利用し、作業設計支援システムの開発には CAD ソフトウェア Simple Modeler (アイコクアルファ) とその API 機能、開発言語として C# を用いている。

2.2 事例検索

本システムではまず、加工対象と類似した加工事例をデータベースから検索する。このとき、図 5 のように過去の加工事例に対して加工対象との類似度を事例検索器でそれぞれ付与し、類似度によって加工事例を複数のクラスタに分類して、類似度が最大の加工事例を含むクラスタを取り出す。クラスタの作成に採用している x-means 法¹⁴⁾は、十分少ない数のクラスタに k-means 法で分割した後、各クラスタに対して適当でないと判断されるまで k-means 法で 2 分割を繰り返す方法である。本研究では、十分少ないクラスタの数を 2 とし、元のクラスタおよび k-means 法で 2 分割したクラスタ全てでベイズ情報量規準を計算し、元のクラスタのベイズ情報量規準が小さくなるまで分割を

Fig. 6 Flow of case retrieval of past machining cases

Table 1 Example of similarity table regarding machining feature type

	Blind hole	Face P	Closed slot	Step
Blind hole	1.00	0.10	0.23	0.21
Face P	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

繰り返す。また、図6に示すように、加工フィーチャの種類、加工フィーチャの寸法およびワークの材料に関する3つの事例検索器を直列につないで設けているが、類似度を付与する方法はそれぞれ異なる。加工フィーチャの種類は、加工方法、工具の種類、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与するため、事例検索器1で類似する加工事例を最優先に抽出する。次に事例検索器2では、工作機械や使用工具に関係する加工フィーチャの寸法が近い加工事例を抽出する。ワークの材料は、主に切削条件に関与するが、切削条件は工作機械や使用工具も影響するため、上記で抽出された比較的類似した加工事例から更に絞り込むために事例検索器3で用いる。

加工フィーチャの種類に関する事例検索器1では、表1に例を示したようにテーブルを用いて類似度を導出する。このためにまず、加工フィーチャの種類ごとに加工方法の事例数をパラメータとして、以下の特徴ベクトル v_i を作成する。

$$v_i = [\text{Machining method A}, \text{Machining method B}, \dots] \quad (1)$$

i は加工フィーチャの種類、Machining method A, Machining method B, ... は、それぞれ図4の5種類の加工方法ごとのデータベースにある事例数である。この特徴ベクトル v_i を加工フィーチャの種類ごとに求め、類似度 S_F を式(2)により導出する。

$$S_{F(j,k)} = \begin{cases} 0 & (|v_j| = 0 \text{ or } |v_k| = 0) \\ (v_j \cdot v_k) / (|v_j| |v_k|) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

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 $v_j = [0, 8, 2, 0, 0]$ (Machining method B の事例 8 件, Machining method C の事例 2 件, その他は 0 件)、同様に種類 k の特徴ベクトル $v_k = [0, 2, 16, 0, 0]$ のとき、式(2)より $S_{F(j,k)} = 0.36$ となり、加工現場独自の加工ノウハウを反映したデータベースの事例に応じて類似度が変化する。

加工フィーチャの寸法に関する事例検索器2では、加工フィーチャ認識時に決定される工具主軸方向と直交する面と工具主軸方向の高さを加工事例および加工対象と比較して、類似度 S_S を式(3)により導出する。

$$S_S = \frac{f(l_c/l_t) \cdot f(w_c/w_t)}{1 + \sqrt{(l_c/l_t - w_c/w_t)^2}} \times \left(1 - \frac{|h_c - h_t|}{h_c + h_t}\right) \quad (3)$$

$$f(a) = \begin{cases} (2-a)^{-1} & (0 < a < 1) \\ a^{-1} & (1 \leq a) \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 7 Definition of machining feature dimensions

Table 2 Example of similarity table regarding workpiece material type

	A5052	S45C	SUS304	SPHC
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
SPHC	0.56	0.59	0.91	1.00

このとき、工具主軸方向の寸法を h 、工具主軸方向に直交する寸法の中で長手方向を l 、短手方向を w と図7のように定義する。また、添え字の c および t はそれぞれ加工事例および加工対象の加工フィーチャ、 a は加工事例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。工具主軸方向と直交する面が加工事例と加工対象で相似に近ければ式(3)の第一項の分母が小さな値になり、完全に相似の場合には最小の1となる。また、寸法が近いほど式(3)の第一項の分子は大きな値になる。さらに、第二項では加工フィーチャの高さが近いほど大きい値となり、類似度 S_S が大きくなる。なお、式(4)は寸法比1を境に非対称な関数であり、加工対象より加工事例の加工フィーチャの寸法が小さいときに大きな値となる。これにより、大型工作機械による大径工具の加工事例よりも、加工対象と比べて小さい寸法の加工事例を優先している。

ワークの材料に関する事例検索器3では、表2に例を示したようにテーブルを用いて類似度を導出する。この類似度テーブルの作成には、過去の加工事例における材料ごとの切込み量や送り速度などの作業情報を含んだ以下の平均特徴ベクトル $\bar{x}_\alpha$ を用いる。

$$\bar{x}_\alpha = \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ \bar{p}_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_\alpha = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{n=1}^{N_\alpha} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_n \quad (5)$$

α は材料の種類であり、 p は送り速度や切込み量など材料に関連する定量的な作業情報で任意に1つ以上選択する。 N_α は材料 α の加工事例の数を表す。この特徴ベクトル $\bar{x}_\alpha$ を材料ごとに求め、類似度 S_M を式(6)で導出する。

$$S_{M(\zeta,\eta)} = 1 - \frac{d_M(\bar{x}_\zeta, \bar{x}_\eta)}{\max_{\beta, \gamma \in D} (d_M(\bar{x}_\beta, \bar{x}_\gamma))} \quad (6)$$

ここで ζ および η は類似度導出の対象となるワークの材料の種類、 D はデータベースに存在する全ての材料の集合であり、 d_M はマハラノビス距離である。また、 β および γ はマハラノビス距離が最大となるとき材料の種類である。例えば、切削速度と1刃あたりの送りを式(5)の p として選択したとき、材料 A, B, C の平均特徴ベクトルはそれぞれ $\bar{x}_A = [142, 0.0988]$ 、 $\bar{x}_B = [229, 0.131]$ 、 $\bar{x}_C = [112, 0.116]$ のように表され、マハラノビス距離は $d_M(\bar{x}_A, \bar{x}_B) = 2.03$ 、 $d_M(\bar{x}_B, \bar{x}_C) = 1.31$ 、 $d_M(\bar{x}_C, \bar{x}_A) = 0.85$ と求まり、式(6)より $S_{M(B,C)} = 0.35$ 、 $S_{M(C,A)} = 0.58$ などと計算され、表1と同様にデータベースの事例に応じて類似度が変化する。

最終的に、図6の3つの事例検索器を介して取り出される加工事例のクラスには複数の加工事例が含まれており、ここから任意の数の加工事例を抽出する。

Fig. 8 Distance of opposite pair of generated surfaces and cylindrical generated surfaces in recognized machining feature

Fig. 9 Candidates of considerable tool entry patterns

2.3 事例修正

抽出した加工事例を加工対象に応じて修正するため、作業者が保有する工具の種類、直径、刃数、有効長、工具長、ホルダ寸法やコーティングの有無のツーリング情報を参照する。加工方法は、工具主軸方向と平行な円筒面が創成面となる Through hole などの円柱形状の加工フィーチャの場合には図 4 の(c)~(e)から、それ以外の加工フィーチャの場合には(a)~(c)から抽出された加工事例の中で最も多い方法を選択する。工具の種類は、工具主軸方向と平行な円筒面が創成面となる円柱形状の加工フィーチャの場合にはエンドミルやドリルから、それ以外の加工フィーチャの場合にはフェイスミルやエンドミルから選択する。ただし、加工方法が図 4 の(c)または(d)で、工具主軸方向と平行な円筒面が創成面となる円柱形状の加工フィーチャの場合には、エンドミルを選択し、加工フィーチャの種類が Chamfer の場合には、面取り工具も選択の候補に含める。工具径については、図 8 に示す加工フィーチャの創成面間の最短距離未満とし、円筒面形状の創成面を含む場合には、さらに円筒面形状の創成面の直径未満として、この条件を満たす最大径の保有工具を選択する。

工具回転速度、工具送り速度や切込み量の切削条件は、切削速度および 1 刃あたりの送りを一定とした先行研究¹²⁾にしたがって修正する。なお、工具の材料、刃数、コーティングの有無やワークの材料の差異を反映するためには切削条件に修正係数を掛け合わせる。加工深さは、加工フィーチャの工具主軸方向の寸法に合わせて修正する。工具進入・退出パターンは、加工フィーチャの種類や創成面を参照して CAM ソフトウェアのパラメータを選択する。利用する CAM ソフトウェアにおいて、フライス加工の工具進入・退出パターンは工具主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 および工具主軸方向と垂直に進入・退出する Side の 4 種類に大別される。この 4 種類の中から、抽出された加工事例の中で最も多いパラメータを選択するが、例えば、図 9 (a)のように 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には、工具主軸方向と垂直な面に工具が進入できない Side は選択しない。一方、図 9 (b)のように 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には、全ての種類が候補となる。

Fig. 10 Tool path patterns in used CAM software

工具経路パターンも加工フィーチャの種類や創成面に基に、抽出された加工事例の中で最も多い CAM ソフトウェアのパラメータを選択する。利用する CAM ソフトウェアで用いる工具経路パターンを図 10 に示す。ただし、Open pocket などのポケット形状の加工フィーチャの場合には図 10 の(c)~(f)から、工具主軸方向と平行な円筒面が創成面となる円柱形状の加工フィーチャの場合には図 10 の(d)を選択する。工具経路方向は抽出された加工事例の中で最も多い方向を選択する。ただし、工具経路パターンが図 10 の(a)または(b)で、Open slot のような 2 つの平行な創成面が 1 組存在する加工フィーチャの場合には、その創成面と平行な方向を選択し、それ以外の加工フィーチャの場合には、工具主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。以上により、必要に応じて修正した作業情報は、加工フィーチャごとに CAM ソフトウェアへ直接入力できる形式で出力する。

2.4 事例登録

事例登録では、過去の加工事例や本システムで推定された作業情報をデータベースへ追加する。このように、加工現場において加工事例は随時蓄積されるが、新たに登録される加工事例を推定する作業情報へ反映するため、事例が追加された場合に事例検索器のルールを自動で更新することが望ましい¹⁵⁾。また、加工現場ごとに異なるデータベースに対して、独自のノウハウを活用できるように事例検索器のルールも加工現場に応じて変わるのが自然である。そこで本研究では、加工フィーチャの種類やワークの材料の類似度テーブルの内容をデータベース内の加工事例数や加工事例の作業情報と関係付けている。加工事例が新たに登録や変更されると、式(1)および(5)の特徴ベクトルのパラメータが変化するため、類似度テーブルが自動で更新され、異なる加工事例が検索されるようになる。

本システムでは、データベースに含まれる加工事例を基に作業情報を推定しており、データベース内に含まれる加工事例が多いほど対処できる問題領域が大きくなる。一方で、過去の加工事例がデータベースに残り続ければ最新の工作機械や工具、ワークに対して不適切な作業情報を推定する恐れもあり、データベースの加工事例を適切に更新して加工現場の変化に対応することは今後の課題である。

3. ケーススタディ

本システムの有用性を検証するため、機械部品加工メーカーより提供された加工事例を用いて部品加工を想定したケーススタディを実施した。データベース A には 265 件の加工事例が格納されており、データベース B にはデータベース A の加工事例に更に 210 件の異なる加工事例を加えて、加工事例が蓄積された

Fig. 11 Workpiece and target shapes in conducted case study

Fig. 12 Recognized machining features and machining sequences

Table 3 Assumed cutting tool in this study

Tool type	Tool diameter	Blade	Tool material	Coating
Face mill	50	4	WC	Coated
Flat endmill	25	2	HSS	Uncoated
Flat endmill	14	2	HSS	Uncoated
Flat endmill	10	2	HSS	Uncoated
Flat endmill	8	2	HSS	Uncoated
Flat endmill	4	2	HSS	Uncoated
Drill	12	2	HSS	Coated
Drill	6.1	2	HSS	Coated
Drill	4	2	HSS	Coated
Chamfer	-	4	WC	Coated

Table 4 Similarity table regarding machining feature type (DB A → B)

	Blind hole	Face P	Closed slot	Step
Blind hole	1.00	0.10 → 0.03	0.23 → 0.11	0.21 → 0.12
Face P	0.10 → 0.03	1.00	0.21 → 0.19	0.40 → 0.36
Closed slot	0.23 → 0.11	0.21 → 0.19	1.00	0.36 → 0.84
Step	0.21 → 0.12	0.40 → 0.36	0.36 → 0.84	1.00

Table 5 Similarity table regarding workpiece material type (DB A → B)

	A5052	S45C	SUS304	SPHC
A5052	1.00	0.72 → 0.57	0.63 → 0.88	0.56 → 0.91
S45C	0.72 → 0.57	1.00	0.61 → 0.65	0.59 → 0.88
SUS304	0.63 → 0.88	0.61 → 0.65	1.00	0.91 → 0.57
SPHC	0.56 → 0.91	0.59 → 0.88	0.91 → 0.57	1.00

状態を再現している。この 2 つのデータベースを用いて、それぞれ作業設計を施し、その推定結果を比較する。図 11 に本ケーススタディで用いたワーク形状および目標形状、図 12 に認識された加工フィーチャおよび加工順序を示す。ワークの材料は A5052 とし、表 3 にまとめた保有工具を想定した。また、ワー

Fig. 13 Flow of extraction of past machining case in machining operation 7

Table 6 Parameters of extracted machining case and its modification at machining operation 7

	Case parameters	Inferred parameters
Machining method	Pocket machining	Pocket machining
Cutting tool	Flat end mill φ 16	Flat end mill φ 4
Spindle speed min ⁻¹	750	3000
Feed rate mm/min.	220	704
Radial depth of cut mm	1.0	0.25
Axial depth of cut mm	9.0	1.8
Machining depth mm	9.0	11.4
Tool entry pattern	Plunge	Plunge
Tool exit pattern	Side	Plunge
Tool path pattern	Concentric out	Concentric out
Tool path direction	CCW	CCW

クの材料の類似度テーブルを導出する際に使用する作業情報は切削速度と 1 刃当たりの送りとし、抽出する加工事例は、3 つの事例検索器で取り出されたクラスタの中から、式(7)により加工作業の類似度 S_T が最大の加工事例を選択した。

$$S_T = W_F \times S_F + W_S \times S_S + W_M \times S_M \quad (7)$$

ここでは 3 つの類似度の重み(W_F , W_S , W_M)として(10^4 , 10^2 , 1)を用いたが、これは加工フィーチャの種類の類似度を優先するように経験的に決定しており、作業者が重視する加工精度や加工時間などに応じて適切な重みを決定することは今後の課題である。加工フィーチャの種類およびワークの材料の類似度テーブルに

Table 7 Machining case parameters extracted from different database

Seq.	Past machining case number	Machining method / Cutting tool Spindle speed min ⁻¹ / Feed rate mm/min. Radial depth of cut mm / Axial depth of cut mm Tool entry pattern / Tool exit pattern	
		Database A	Database B
		Face milling / Face mill ϕ 80 1090 / 1308 62 / 0.5 Side / Side	Pocket milling / Face mill ϕ 20 2380 / 714 15 / 1.0 Plunge / Rump
1	192		
2	193	Pocket milling / Face mill ϕ 80 1090 / 1308 60 / 0.5 Side / Plunge	
3	51	Drilling / Drill ϕ 2.8 3638 / 218 - / - - / -	
4	261	Drilling / Drill ϕ 9 2470 / 371 - / - - / -	Spiral milling / End mill ϕ 6 790 / 158 - / - Helical / Plunge
5			
6	245	Drilling / Drill ϕ 11 570 / 104 - / - - / -	Drilling / Drill ϕ 11 570 / 104 - / - - / -
7	73	Contour milling / End mill ϕ 12 1326 / 477 8.4 / 12.0 Side / Side	Pocket milling / End mill ϕ 16 750 / 220 0.69 / 9.0 Plunge / Side
8	73	Contour milling / End mill ϕ 12 1326 / 477 8.4 / 12.0 Side / Side	Pocket milling / End mill ϕ 16 1590 / 1110 1.0 / 10.0 Plunge / Side
9	171	Contour milling / End mill ϕ 20 1980 / 594 0.5 / 0.5 Side / Side	Pocket milling / End mill ϕ 12 1720 / 261 9.0 / 1.0 Plunge / Plunge
10	146	Pocket milling / End mill ϕ 8 5010 / 1503 0.8 / 5.0 Rump / Plunge	
11	76	Contour milling / End mill ϕ 16 1592 / 573 11.2 / 1.5 Side / Rump	
12	56	Spiral milling / End mill ϕ 16 2149 / 473 - / - Plunge / Plunge	
13			
14	260	Drilling / Chamfer 350 / 35 - / - - / -	Drilling / Chamfer 500 / 50 - / - - / -

Table 8 Operation parameters inferred according to different database

Seq.	Machining method / Cutting tool Spindle speed min ⁻¹ / Feed rate mm/min. Radial depth of cut mm / Axial depth of cut mm Tool entry pattern / Tool exit pattern	
	Database A	Database B
	Face milling / Face mill ϕ 50 2442 / 2686 38.8 / 0.5 Side / Side	Pocket milling / Face mill ϕ 50 1333 / 550 37.5 / 1.0 Plunge / Rump
1		
2	Pocket milling / End mill ϕ 25 4883 / 4297 18.75 / 0.47 Side / Plunge	
3	Drilling / Drill ϕ 4 2547 / 153 - / - - / -	
4	Drilling / Drill ϕ 6.1 8503 / 2004 - / - - / -	Spiral milling / End mill ϕ 4 1989 / 62 - / - Helical / Plunge
5		
6	Drilling / Drill ϕ 12 732 / 146 - / - - / -	Drilling / Drill ϕ 12 732 / 146 - / - - / -
7	Contour milling / End mill ϕ 4 9282 / 5251 2.8 / 4.0 Plunge / Plunge	Pocket milling / End mill ϕ 4 3000 / 704 0.25 / 1.8 Plunge / Plunge
8	Contour milling / End mill ϕ 14 2652 / 1500 9.8 / 11.4 Plunge / Plunge	Pocket milling / End mill ϕ 14 1817 / 1015 0.88 / 7.0 Plunge / Plunge
9	Contour milling / End mill ϕ 10 5544 / 1830 0.25 / 0.25 Side / Side	Pocket milling / End mill ϕ 10 2890 / 483 7.5 / 0.83 Plunge / Plunge
10	Pocket milling / End mill ϕ 8 7014 / 1852 0.8 / 4.0 Rump / Plunge	
11	Contour milling / End mill ϕ 10 5941 / 3361 7.0 / 1.9 Side / Rump	
12	Spiral milling / End mill ϕ 4 2057 / 149 - / - Plunge / Plunge	
13		
14	Drilling / Chamfer 204 / 40 - / - - / -	Drilling / Chamfer 625 / 78.1 - / - - / -

について、データベース A と B それぞれで導出されたテーブルの一部を表 4 および表 5 に示す。表内では左にデータベース A、右にデータベース B での類似度を記載しているが、加工事例が蓄積されることで類似度が変化していることが分かる。

図 12 の加工作業 7 を例として、データベース B の加工事例に対する事例検索の流れを図 13 に示す。ここでは、まず表 4 の加工フィーチャの種類の類似度テーブルにより、類似度 S_F が加工事例に付与され、この S_F を基にクラスタ C_{F1} または C_{F2} へ加工事例が分類されている。次に、最大の S_F を含むクラスタ C_{F1} の加工事例が加工フィーチャの寸法に関する事例検索器へ入力され、類似度 S_S が付与されて、この S_S を基にクラスタ C_{S1} または C_{S2} へ加工事例が分類されている。同様に、最大の S_S を含むクラスタ C_{S1} の加工事例が次のワークの材料に関する事例検索器へ入力され、表 5 のワークの材料の類似度テーブルにより、類似度 S_M が加工事例に付与され、クラスタ C_{M1} , C_{M2} または C_{M3} へ加工

工事例が分類されて、最終的に、最大の S_M を含むクラスタである C_{M1} から類似度 S_T が最大の加工事例が抽出されている。

次に、抽出された加工事例は、加工対象に応じて表 6 のように修正される。ここでは、加工フィーチャの種類が Through pocket であるため、表 3 のフェイスミルやフラットエンドミルが工具の種類の候補となる。工具径は創成面間の最短距離が 28 mm であるものの、R 2.5 mm の円筒状の創成面を有するため、工具径は 5 mm 未満となる。したがって、ここでは ϕ 4 mm のフラットエンドミルが選択されている。切削条件は先行研究¹²⁾を基に修正される。例えば、加工事例の工具回転速度と送り速度はそれぞれ 750 min⁻¹, 220 mm/min であり、切削速度を一定とすると工具回転速度が 3000 min⁻¹ となり、工具刃数の差異を反映させる修正係数が 0.8 であるため、送り速度は $0.8 \times 220 \times 3000 / 750 = 704$ mm/min と修正されている。加工深さは加工フィーチャの工具主軸方向の寸法に合わせて 11.4 mm に修正されている。工

Fig. 14 Machining simulation of machining operation 7 in CAM software

具進入・退出パターンは加工フィーチャの種類が Trough pocket であるため、工具主軸方向と平行な方向に進入・退出する Plunge が選択され、工具経路パターンおよび工具経路方向は加工事例の作業情報を基に、それぞれ Concentric out および CCW が選択されている。

データベース A および B それぞれで抽出された加工事例と推定された作業情報の一部を表 7、表 8 に示す。データベース B に追加された加工事例の影響で、図 12 の加工作業 1、4～9 および 14 では、2 つのデータベースにおいて異なる加工事例が抽出されていることが分かる。加工作業 1、4、5 および 7～9 では、抽出された加工事例の加工方法の違いから、加工作業 7 の Contour milling と Pocket milling のように異なる加工方法が選択されている。また、抽出された加工事例における使用工具や切削条件の違いから、加工作業 1、4、5、7～9 および 14 では、異なる切削条件が推定されている。さらに、加工作業 7 および 8 では、加工フィーチャの種類が Through pocket であることから、工具進入・退出パターンが Side から、Plunge へと修正されている。ここで推定された作業情報を用いて、図 14 のように CAM ソフトウェアを用いて切削シミュレーションを実施した結果、目標形状に至るまで問題なく加工できることを確認した。

以上から、データベースに蓄積された加工事例に応じて、加工事例が抽出され、推定する作業情報も変化するとともに、NC プログラムを生成するのに必要な作業情報が本システムにより適切に推定できることが分かった。

4. 結 論

本研究では、部品加工の準備時間を短縮するために、加工フィーチャを利用した事例ベース推論によって、CAM ソフトウェアで NC プログラムを生成するために必要な作業情報を推定できる作業設計支援システムを開発した。また、異なる加工事例が登録されたデータベースを用いて、認識された加工フィーチャごとの作業情報を推定するケーススタディにより、本システムの有用性を検証し、以下の結論を得た。

- (1) 加工フィーチャの種類・寸法とワークの材料を用いて、加工対象と類似した加工事例を抽出し、加工事例の作業情報を加工対象に合わせて修正する事例ベース推論により切削条件だけでなく、加工方法や使用工具なども含めた NC プログラムの生成に必要な作業情報を推定できることを示した。
- (2) 蓄積された加工事例が異なる 2 つのデータベースを準備してそれぞれで作業設計を施した結果、データベースごとに事例検索器のルールが自動で変更されることで、抽出される加工事例が変化するとともに、推定される作業情報にも差異が生じ、蓄積された加工事例に含まれる加工現場独自のノウハウが継承できる可能性を示した。

参 考 文 献

- 1) W. Fu, A. A. Eftekharian and M. I. Campbell: Automated Manufacturing Planning Approach Based on Volume Decomposition and Graph-Grammars, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, **13**, 2 (2013) 021010.
- 2) K. Dwijayanti and H. Aoyama: Basic Study on Process Planning for Turning-Milling Center Based on Machining Feature Recognition, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, **8**, 4 (2014) JAMDSM0058.
- 3) E. Morinaga, T. Hara, H. Joko, H. Wakamatsu and E. Arai: Improvement of Computational Efficiency in Flexible Computer-Aided Process Planning, *International Journal of Automation Technology*, **8**, 3 (2014) 396.
- 4) Y. Shi, Y. Zhang, K. Xia and R. Harik: A Critical Review of Feature Recognition Techniques, *Computer-Aided Design and Applications*, **17**, 5 (2020) 861.
- 5) 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*, **83**, 850 (2017) 16-00574.
- 6) Y. Inoue and K. Nakamoto: Development of a CAPP System for Multi-Tasking Machine Tools to Deal with Complicated Machining Operations, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **14**, 1 (2020) JAMDSM0006.
- 7) A. Iqbal, N. He, L. Li, N. Dar: A Fuzzy Expert System for Optimizing Parameters and Predicting Performance Measures in Hard-Milling Process, *Expert Systems with Applications*, **32**, 4 (2007) 1020.
- 8) 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*, **74**, 1 (2008) 92.
- 9) 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*, **56**, 12 (2012) 824.
- 10) 椎木祐策, M. M. Isnaini, 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*, **81**, 832 (2015) 15-00280.
- 11) I. Nishida, and K. Shirase: 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*, **12**, 4 (2018) JAMDSM 0093.
- 12) 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*, **67**, 9 (2001) 1485.
- 13) Y. Watanabe and K. Nakamoto: Proposal of a Machining Features Recognition Method for 5-Axis Index Milling on Multi-Tasking Machine Tools, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **14**, 7 (2020) JAMDSM0108.
- 14) 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*, **18**, 1 (2006) 3.
- 15) 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*, **36**, 1 (1995) 41.