特徴解消による軸対称鍛造製品の工程設計エキスパートシステム*

大橋 隆 弘^{*1}, 本 村 貢^{*2}Expert System for Forging Sequence Design of Axis-symmetric Products
Using Feature Elimination

Takahiro OHASHI and Mitsugu MOTOMURA

Feature elimination method for computer-aided forging process planning is reported in this paper. The authors think that forming is the procedure adding features to a raw material and process planning is the procedure eliminating features from a product. This procedure is done only in planner's mind. The authors attempt to implement this feature eliminating procedure for forging sequence design on computers. Eliminating order is determined by using characteristic vector of 'pair matrix.' Elements of 'pair matrix', called 'pair elements', are calculated from the possibility that one of features is formed earlier than the another. Each possibility is compiled from a forge expert's 'know-how' by comparing each two kinds of feature. Possibility is computed by fuzzy inference if it cannot be determined from only kind of a pair of features, but also dimensions. We call this case 'dimension problem'. The authors apply the above methodology on manufacturing sequence design of axis-symmetric forging products, and investigate data of pair matrix and reasoning rule for dimension problem by interview with forge experts.

Key Words: Forging, Process Planning, Expert System, Computer-Aided Design (CAD), Knowledge Engineering

1. 緒言

鍛造用CAPP(Computer-Aided Process Planning)システムの動作は, 一般に①鍛造製品形状の記号化(形態表現)・認識, ②鍛造工程設計専門家の知識の適用(推論)という2つの段階に分けられる. 専門家知識は, 鍛造品形状への操作を含むために, 知識のデータベース化とそれを利用した推論の手法は, 製品の形態表現の形式と密接な関係を持つ. そのため, 必然的に, ①, ②の二つの動作について明確に区別してなされた鍛造用CAPPシステムの研究はあまり見られず, 鍛造製品の形態表現手法と工程推論アルゴリズムはお互いの存在を前提として一体のものとして構築されてきた. 例えば, 軸対称形状の冷間鍛造についての従来の研究例においては, 基本的図形を軸上に連結し鍛造品形状を表現することで, 鍛造品形状を一次元の記号列として記号化したり⁽¹⁾⁽²⁾, 軸を含む断面の外形を軸に沿ったグラフで表し, グラフのパターンによってCAPPシステムに形状を記

号化・認識させている⁽³⁾⁽⁴⁾. 又, 軸対称の熱間鍛造においてL字型の要素の集合で鍛造品の形状を表している例もある⁽⁵⁾. これらの方法では, 工程推論・工程設計知識の記述に際して形状表現の持つ暗黙の幾何学的制約を前提条件としてうまく利用している. しかし, そのため処理可能な鍛造製品形状に幾何学的制約があり, 軸対称の複雑で自由な形状の鍛造製品に適用することは難しい. 一方, 複雑な形状を持つ鍛造品に関しては, コネクティングロッドの熱間鍛造における工程設計作業をコンピュータ上に実現した例⁽⁶⁾がある. これは前者らの汎用的なシステムとは異なり, 専門家の定型的な作業をコンピュータを用いて自動化した, コネクティングロッド専用システムであり, 設計対象は限定される.

このように, 従来の研究では, 汎用的な推論アルゴリズムを採用したCAPPシステムにおいて, 形状表現法の幾何学的な制約への推論アルゴリズムの依存が大きく, 対象鍛造品形状が単純になる傾向があった. 逆に複雑な鍛造製品形状を対象としたシステムは特定の種類の鍛造品の専用のアルゴリズム

* 原稿受付 1997年3月5日.

*¹ 正員, 早稲田大学理工学部(現:工業技術院機械技術研究所)[科学技術振興事業団科学技術特別研究員](〒305-8564 つくば市並木1-2)).*² 正員, 早稲田大学理工学部(〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1).

となる問題点があった。このため、将来において、複雑な鍛造品形状に適用可能な汎用の鍛造工程設計システムを構築するためには、鍛造製品に汎用的に対応し、かつ形状表現法に知識表現が深く依存しない鍛造工程推論アルゴリズムの開発が重要である。

そこで、本論文では、上記の問題に対応可能な鍛造用CAPPシステム構築の一手法として、鍛造製品形状から、形状特徴を抽出・置換・解消して自動工程設計を行う方法について提案し、それに基づいて開発したシステムについて報告する。本論文のシステムでは、軸対称熱間鍛造品を対象とし、その断面をベクトル列で表現した二次元図形として扱う。本論文のシステムは、従来の研究では対応が難しかった自由曲線を含んだ鍛造品形状の取り扱いが可能である。また、本論文で示す推論手法は、鍛造品の形態表現手法の持つ幾何学的制約に深く依存していないため、取り扱い形状が複雑化しても、特徴抽出・操作の問題を各々の形態表現法に応じて解決すれば、アルゴリズムの改良でそのまま対応できると思われる。本報の概要を以下に述べる。

まず最初に、形状特徴解消による工程設計の考え方について解説し、その後、本報で採用した鍛造製品の形態表現法とそれを用いた形状特徴の抽出法について述べる。次に、形状特徴の解消順序を対比較法とファジィ推論によって決定する方法について述べる。専門家からの知識収集は、形状特徴同士の一対比較をファジィ言語によって評価する形式によった。最後に実際の工程設計例を示す。

2. 形状特徴解消による工程設計作業のモデル化

筆者らはコンピュータによって鍛造工程設計を行うにあたって、加工工程とは、素材に形状的な特徴を付与する作業であると捉え、また工程設計作業は、この加工工程の逆過程と捉えた。

工程設計の開始時点で得られる情報は、最終製品に要求される形状特徴である。設計者はそれらの形状特徴を実現する加工を選択し、その加工の適用前の素材を得ることで形状特徴の解消、すなわち工程の設計を行う。それらの作業を模式的に表したのが図1である。

設計者の認識（図1における特徴プール）の中には、実現しなければならない形状特徴についての情報が数多くつまっている。設計者はそれらの形状特徴を、優先順位にしたがって取り出し、実現しようと試みる。実現方法が決定された形状特徴は解決済

Fig.1 Model of process planning.

みであるとして、専門家の認識の中から外される（解消）。これらの優先順位はあいまいさを含んでいるので、ある設計段階で優先的に解消される形状特徴は1通りだけとは限らず、複数の工程案が検討される。特徴解消の作業は次のような順序で処理される。

- ①競合する形状特徴がない場合はその特徴を解消することによって1工程分の推論を進める。
- ②競合する形状特徴が存在する場合は、その優先順序を何らかの形で判定する。
- ③解消優先順序が優位の特徴を解消する。
- ④上記の結果に対して、新たに形状特徴を生成し直し、特徴プールへ入れる。
- ⑤①-④を繰り返し、特徴プールの全ての形状特徴が解消されるか、素材形状が得られたと判定された時点で工程設計を終了する。

筆者らは上記モデルをコンピュータで実現するにあたって、以下にのべるような手法で形状特徴の抽出を行った。

3. 鍛造品の形態表現法と形状特徴の抽出

3・1 鍛造品の形態表現法 本報で用いた鍛造品の形態表現法は、製品外形をベクトルの連結で表現する方法である。図2にその例を示す。ベクトルは反時計回りに連結され、矢印方向に向かって左側が常に製品の実体となる。

この表現方法で記述された形状について、角度 α に着目して、 $\alpha < 180^\circ$ ならば「+」、 $\alpha = 0$ ならば「0」、 $\alpha > 180^\circ$ ならば「-」というように符号で表した角度シンボルのリストを生成する。さらに微小な連続変化を伴う同種の連続した角度シンボルは一つの区切り（角度シンボル）にまとめる。この

Fig.2 Shape representation for a axis-symmetrical forging.

Fig.3 The first features.

Fig.4 The second features.

Fig.5 The third features.

Fig.6 The forth features.

区切りを一次特徴と呼ぶ(図3)。さらに、+または-の角度シンボル列中に微小な0シンボルが存在していた場合は、挟まれた角度シンボルの区切りに含め、一つの特徴として扱う。こうして得られた一次特徴を用いて図4に示すような、外形線ベクトルの方向の変化の組み合わせのみに着目して定義された二次特徴を抽出する。さらにこの2次特徴の組み合わせと中心軸に関する位置関係、向きを考慮して定義された、図5に示す三次特徴を抽出する。さらに加工上意味を持つ三次特徴の組み合わせとして定義された四次特徴(図6)を抽出する。これらの特徴抽出は以下に述べるような事例ベース型推論を用いたアルゴリズムによって行われる。

3・2 特徴事例ベースによる形状特徴の抽出
図7に事例ベース型推論を用いた形状特徴抽出アルゴリズムの模式的な図を示す。特徴事例は、角度リスト、または特徴名の組み合わせを検索キーとした被抽出特徴名、抽出可否判定手続きをデータとして持つデータセットである。また、特徴事例ベースはそのデータベースである。システムは、まず、検索キーを用いて適合する可能性のある特徴を検索することで、特徴を仮抽出する。その後、各々の事例上に記述された抽出可否判定手続きに従って、その事例が真に有効かどうかを検査する。もし有効ならば、事例が発火可能であることを推論エンジンに知らせる。特徴抽出推論エンジンはその知らせを受けて、特徴を特徴プールと呼ばれる集合に代入する。この作業は再帰呼び出しによって網羅的に行われるため、何通りかの特徴群が得られる。こうして得られた形状特徴の加工優先順序を決定し、解消する。

4. 一対比較法による特徴解消優先順序の決定と形状特徴の解消

4・1 工程設計専門家に対する特徴解消順序の調査
本報では、専門家に対する特徴解消順序の

Fig.7 Case-based reasoning for feature extraction.

Fig.8 Example question to a expert of forging process planning.

調査を，一対比較法⁽⁷⁾とファジィ言語⁽⁸⁾を用いて行った．調査の際に専門家に対して用いた質問カードを図8に示す．これにより，ある特徴の対に対して，一方の特徴が他方の特徴に対して加工が優先する確からしさを調査した．多くの場合，対象とする鍛造品のもつ寸法値によってこの評価は変化するために，もし～ならば，といった条件を付けて回答することも許した．確からしさの評価は，高い(High)，低い(Low)という基本語句に，たいへん(Ver)，やや(Sort of)，どちらかという(Rather)という言語ヘッジ(Hedge)を付加したファジィ言語表現を用いる．基本語句High, Lowの定義は，それぞれ，

$$\text{High} = \{0/0, 0.1/0.1, 0.2/0.2, 0.3/0.3, 0.4/0.4, 0.5/0.5, 0.6/0.6, 0.7/0.7, 0.8/0.8, 0.9/0.9, 1.0/1.0\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Low} = \{1.0/0, 0.9/0.1, 0.8/0.2, 0.7/0.3, 0.6/0.4, 0.5/0.5, 0.4/0.6, 0.3/0.7, 0.2/0.8, 0.1/0.9, 0.1/0.1\} \dots\dots\dots(2)$$

ヘッジVer, Rather, Sort ofの定義はそれぞれ，

$$\text{Ver } A = \text{CON}(A) \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Rather } A = \text{NORM}(\text{INT}(\text{CON}(A) \text{ AND } \overline{\text{CON}(A)})) \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Sort of } A = \text{NORM}(\text{INT}(\text{DIL}(A) \text{ AND } \overline{\text{INT}(\text{DIL}(A))}) \cdot (5)$$

とした．これらの調査を基に次節に示すような手法を用いて形状特徴解消の優先順序(＝加工優先順序の逆順)を計算する．

4・2 特徴解消の絶対優先順序の計算 簡単のために，まず，二特徴間の加工優先順序が寸法値によって変化しない場合を仮定する．特徴 n と特徴 m を比較して， n の方を先に加工する確からしさ p が専門家の評価によって得られたものとする．すると， n と m の一対比較要素 w_n / w_m を，

$$p = \frac{w_n}{w_n + w_m} \dots\dots\dots(6)$$

より，

$$\frac{w_n}{w_m} = \frac{p}{1-p} \dots\dots\dots(7)$$

とする．ここで， w_n, w_m は特徴 n, m の解消の絶対的優先度を表す重みである．また，前節の通り p はファジィ言語の形式 $\tilde{p}$ で与えられるため，(8)式のように重心法によって $\tilde{p}$ をクリスプ化する．

$$p = \frac{\int_{U \in Y} y \times \mu_{\tilde{p}}(y) dy}{\int_{U \in Y} \mu_{\tilde{p}}(y) dy} \dots\dots\dots(8)$$

こうして得られた一対比較要素

$$\left\{ \frac{w_1}{w_1}, \frac{w_1}{w_2}, \dots, \frac{w_1}{w_n}, \frac{w_2}{w_1}, \frac{w_2}{w_2}, \dots, \frac{w_2}{w_n}, \dots, \frac{w_n}{w_1}, \frac{w_n}{w_2}, \dots, \frac{w_n}{w_n} \right\}$$

を用いて，一対比較ペアマトリックス A を次のように構成する．

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

すると，一対比較法としてよく知られる方法によって，明らかに

$$A w = s \cdot w \quad (s \text{ は定数}) \dots\dots\dots(10)$$

より，加工優先順序の重み列 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ が，一対比較マトリックス A における非0の固有値に対応する固有ベクトルとして得られる．工程設計は加工の逆過程であるので，工程設計を行うとき，各特徴は重みの逆順に解消すればよい．

4・3 寸法値問題 前節は，形状特徴の組み合わせの種類だけで加工優先順序が決まってしまう単純な例であり，実際にはほとんどの場合，組み合わせの種類が同じであっても，寸法値によって先に加工する確からしさ p は変動する．そこで，寸法値による p の変化をファジィ推論を用いて処理した．

すなわち，ある特定の寸法値が， x ならば，特徴 n が特徴 m より先に加工される確からしさ $\tilde{p}$ であることが既知であるものとする．するとファジィ推論によって推定される寸法値 x' 時の確からしさ $\tilde{p}'$ は，マムダニの含意(Mamdani's proposition)を用いて，

$$\tilde{p}' = x' \circ R_m \dots\dots\dots(11)$$

ただし, $R_m = \bar{x} \times \bar{p}$

と求められる. さらに, (8)式と同様に $\bar{p}$ を重心法によって非ファジィ化した p' を用いて, 一対比較要素

$$\frac{w_n}{w_m} = \frac{p'}{1-p'} \dots \dots \dots (12)$$

を得, ペアマトリックスを構成する. これにより特徴解消順序について, 4・2節同様の取り扱いをすることができる.

寸法値問題に対する専門家の回答の一例を図9に示す. 寸法値問題で用いる寸法値は, 予め基本語句が全て三角ファジィ数として定義しておく. この寸法地には, 言語ヘッジ longer than, shorter than, sort of を作用させることもできる.

これにより式(5)に示すファジィ推論を用いて専門家の回答をルール化する. 例えば, 図9の例では, If L2 = longer than 50 then p = 'high'

となる. ただし, longer than, shorter than の定義は次の通り.

Longer than A = A to Amax $\dots \dots \dots (13)$

Shorter than A = A to Amin $\dots \dots \dots (14)$

A to B = CON(A $\vee$ B) $\dots \dots \dots (15)$

ただし, Amax, Amin はファジィ数のボキャブラリ中の最大値と最小値

また, このようなファジィ推論を用いず, 単純な大小判定を前件部として記述し, 後件部にファジィ数を返すようにルールを定義することもできる.

4・4 各特徴の解消方法 本研究のシステムでは, 形状特徴はオブジェクト指向データとなっており, それぞれに固有な解消手続が内包されている. そのため, 特徴の解消は, 該当する特徴に対して解消するようにメッセージを送ること (Message passing) によって行われる. 専門家から得た知識や一対比較法の結果得られた解消順序にはあいまいさがあることを考慮して, 解消優先順序が最も高い (=加工優先順序が低い) 特徴の解消案のみを採用するのではなく, 上位3通りの特徴解消案が採用される. こうして得られた三通りの一工程分の工程設計結果それぞれについて, 再び形状特徴抽出から特徴解消に至る動作が適用され, 更に一工程前の工程が創出される. こうした動作を素材形状が得られるまで繰り返し, 製品形状から出発して樹系図状に枝分かれし素材に至る複数の工程設計案を得る. これら設計案の中からの最適な工程案の発見は, シス

When L2 is larger than about 40 [mm], we should manufacture Projection B earlier.
When L2 is smaller than about 5 [mm], we should do both in a time.

Fig.9 An answer for dimension problem No.27 by a expert.

Fig.10 Flow-chart of process planning

テムにより検討されることはなく, ユーザーの取捨選択に任されている. 最適性の判断は机上の要素以外の様々な状況によっても変化するため, 人間の高度な状況把握・意思決定力を活用し, コンピュータシステムは支援システムに分業することが効率的である. 以上のアルゴリズムをフローチャートとして図10にまとめる.

5. システムの実行例

システムのプログラミングはオブジェクト指向言語であるSmalltalkを用いてMS-Windows上で行った. 推論結果の一例を図11~18に示す. 図11に示した鍛造製品について特徴抽出を行った結果, 図12に示すような特徴抽出結果が得られた. 図中左側に抽出された特徴が示されている. これらの特徴に対し解消優先順序の計算を行ったところ, 解消優先順序上位3つの特徴は図13のようになった. このうち下側部中央付近に属するCenterHoleが解消された結果を図14に示す. この形状に関し, さらに加工優先順序の計算を行った結果が図15である. このうち上側中央付近のCenterHoleが解消された結果

Fig. 11 Example forging product

Fig. 12 Extracted features at the first step.

Fig. 13 Example of feature elimination at the first step. This may be the latest forging process.

Fig. 14 Extracted features at the second step.

Fig. 15 Example of feature elimination at the second step.

Fig. 16 Extracted features at the third step.

Fig. 17 Example of feature elimination at the third step.

Fig. 18 An extracted feature at the final step. This shape may be blank material.

が図 1 6 である。さらにこの形状に対し、図 1 7 のように、解消優先順序上位 3 つの特徴が計算され、そのうち、Ribが解消された結果が図 1 8 に示されている。最終的に残った形状特徴Flangeは素材が持ちうる形状特徴であるため、素材形状が得られたと判断される。これにより、最初の鍛造品形状に関する工程設計が一通り行われたことになる。前述の通り、システムにより提案される工程設計案は一通りではなく、図 1 3, 1 5, 1 7 から明らかなように、製品形状を出発点とした樹系図状になる。このように本報で提案する特徴解消法によって問題無く鍛造工程案が得られ、本手法は鍛造工程設計 C A P P のアルゴリズムとして有効である。

6. まとめ

本報では、鍛造工程設計の自動化の方法の一つとして、形状特徴解消による手法を示した。専門家の知識収集は一対比較によるため、比較的少ない量の情報収集によって特徴群全体の優先順序の決定が可能となる。また、寸法値の変化によって優先順序が変わる寸法値問題をファジィ推論を用いて定式化した。

参考文献

- (1)小坂田宏造・門哲史・楊国彬, 昭和 6 3 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1988), 517-520.
- (2)高田修・山崎知彦・白井徳雄, 中西広吉, 団野敏, 今井博, 日本機械学会第 2 回 FAN シンポジウム講演論文集, 920-87(1992), 191-196.
- (3)島村三郎・三田村一広・石原章, 昭和 6 3 年度塑性加工連合講演会講演論文集, (1988), 343-346.
- (4)B. Lengyel, Trans. Am. Manuf. Res. Inst. SME, 17 (1989), 30-33.
- (5)Subramanian, T.L., Akgerman, N., Altan, I., North Am. Metalwork Res. Conf., 5(1977), 198-203.
- (6)矢部益・福安富彦・谷本伸孝・後藤隆, 塑性と加工, 34-387(1993), 382-390.
- (7)例えば, 浅井喜代治, ファジィ経営科学入門, (1992), 43-48., オーム社
- (8)シュマッカー, G.J. 著・鬼沢武久訳, ファジィ集合自然言語演算とリスク解析, (1984), 啓学出版