板金製品の曲げ作業自動工程設計システムの開発*

乾 正知** 紀之定 章*** 鈴木宏正†
木村文彦†† 佐田登志夫†††

Automatic Process Planning for Sheet Metal Parts with Bending Simulation

Masatomo INUI, Akira KINOSADA, Hiromasa SUZUKI,
Fumihiko KIMURA and Toshio SATA

In sheet metal part manufacturing, bending is most commonly used in order to obtain rigidity and to obtain a part of desired shape to perform a certain function. The importance of process planning automation is well understood, and recently some experimental CAPP systems for bending operations have been constructed. However, current CAPP systems lack the ability of simulating the sheet metal bending modification, so many kinds of process planning constraints are difficult to utilize. To solve this problem, a bending operation simulator is developed and incorporated in our new process planning system AMPS. This simulator manipulates the modification of the sheet metal part as the transformation of thin plate solid models which represent the geometrical shape of the sheet metal part. By using the simulation result effectively for evaluating the constraints, process planning of complicated sheet metal part is computerized.

Key words: sheet metal part, automatic bending process planning, production system, rule-based system, product modeling, solid modeling, bending simulation

1. は じ め に

板金製品は、切断加工によって得られた素材板金に対して、各種の変形作業を加え製造される。変形作業のなかで曲げ加工は、製品の剛性を高めたり、ある機能を実現する製品形状を生成するために良く用いられる¹⁾。板金製品の多品種少量生産では、この曲げ加工は汎用の曲げ機械とパンチやV字型を用い手作業で行われる(図1)。この曲げ加工手順の決定や曲げ工具の選択、NCデータの生成を行う工程設計は、製造コストや加工時間の削減に大きな影響を与えるため、その自動化を目指した研究が幾つか行われている²⁾。しかしそれらの手法の多くは、工程設計において重要な、曲げに伴う製品情報の変化に関する拘束を評価することができないため、曲げ加工手順決定の自動化に適用

することはできなかった。

われわれは、この曲げ加工工程設計の自動化を実現するために、プロダクトモデルを基に曲げ加工をシ

Fig. 1 Bending with a punch and V-die

* 原稿受付 昭和63年2月2日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月27日)にて発表

** 学生会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 正会員 三田工業(株)(大阪市東区玉造1-2-28)

† 正会員 東京大学教養学部(東京都目黒区駒場3-8)

†† 正会員 東京大学工学部

††† 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)

Fig. 2 Stress during bending

ミュレーションする機能を工程設計システムに導入した。このシミュレーション機能を利用することで、試作システムは複雑な板金製品の工程計画を自動的に生成することができた。

2. 板金プロダクトモデル

曲げ加工工程設計を自動化するためには、板金製品を適切なプロダクトモデルとして計算機内に表現する必要がある。このプロダクトモデルの概念とその表現の枠組みについてはすでに報告されている³⁾。実際の工程設計では、工程設計技術者は曲げ作業とその逆操作にあたる展開作業の影響をいつも念頭においている。したがって、板金プロダクトモデルは、計算機によって容易にかつ正確に曲げや展開が評価できるように実現される必要がある。

曲げ加工では、変形は加工力が作用する曲げ軸付近にのみ発生し、残りの部分の形状や輪郭が変化することはない⁴⁾。また変形がおこる局所的な部分では、その片面は引き伸ばされる方向に、また逆の面は圧縮される方向に応力が作用する。したがってこの部分の切断面を考えると(図2)、応力が全く作用しない面が存在することになる。この面は断面図では線となることから中立軸とよばれ、この軸にそって変形がないことから加工前の素材の長さを表現していることになる。そこでわれわれは、板金の曲げ変形を、図3に示すように、中立軸の長さが不変であることを考慮して得られる仮想的な軸 Ax 周りの回転として近似することを考えた。中立軸の位置を示す係数 k は、板金の材質や厚さによって異なるが、一般には0.4が与えられる。ここで、回転角 $\varphi = \psi = 180 - \omega$ (ここで ω は曲げ角度) に等しければ、曲げられた状態が表現され、また $\varphi = 0$ であれば、展開された状態が表現される。

この近似手法では、板金製品を、変形しない部分を表現する剛体の板(プレート)と、そのプレートの曲

$$\begin{aligned}\psi &= 180 - \omega \text{ (degree)} \\ AB &= (r + kt) \frac{2\pi\psi}{360} \\ A'Ax' &= \frac{AB}{2} \\ CO &= (r + kt) \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ A'O &= (r + t) \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ CAx &= CO \frac{A'Ax'}{A'O}\end{aligned}$$

Fig. 3 Definition of the centerline of bending rotation

げ回転軸を表現する仮想的な軸(ベンド)とによって表現することができる。われわれは、これらを一階述語論理に基づくプロダクトモデリングの枠組みの上に表現した³⁾。

(1) プレートとベンドの定義：プレートは、板状のソリッドモデルとして生成され、プロダクトモデルデータベースに次に示す述語を用いて記述される。

plate(Plate1).

ここでPlate1は、生成されたプレートの名前である。板金の板厚などは、プレートの属性として記述される。ベンドも同様にデータベースに記述される。また曲げ角度、曲げ半径、曲げ部の長さなどはベンドの属性として記述される。

(2) 曲げ関係：2枚のプレートとそれを接続するベンドの関係は、bend-relationと呼ばれる述語を用いて記述される。例えばBend1とその左右のプレートPlate1, Plate2との間の関係は、

bend-relation(Plate1, Plate2, Bend1),

と記述される。

(3) その他の製品情報：寸法や公差などの製品情報は、プレート間の関係や属性として記述される。

3. 曲げ操作

われわれの板金プロダクトモデルの定義では、曲げ加工に伴う板金の形状変化は、ベンドに関してプレートを回転移動させることで取り扱われる。本節では、文献4)に従って同次変換について簡単に説明し、次いでその同次変換に基づいた曲げ加工シミュレーション

手法について述べる。

3.1 同次変換

以下位置ベクトルは英小文字で、また座標系は英大文字で表現する。

(1) ベクトル：位置ベクトル $v = ai + bj + ck$ (i, j, k は x, y, z 座標軸に平行な単位ベクトル) は、同次座標系では次の行列で表現される。

$$v = [x, y, z, w]^T \quad (a = x/w, b = y/w, c = z/w)$$

(2) 座標変換：座標空間の変換 H は 4×4 の行列によって取り扱われる。ある位置ベクトル u を H によって変換した位置ベクトル v は、行列演算 $v = Hu$ によって得られる。ベクトル $ai + bj + ck$ に関する平行移動に相当する変換は、

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

により、また x 軸に関して角度 ω だけ回転する変換は

$$\text{Rot}(x, \omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

により表現される。

(3) 逆変換：変換行列 T とその逆変換は、

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -p \cdot n \\ o_x & o_y & o_z & -p \cdot o \\ a_x & a_y & a_z & -p \cdot a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。ここで p, n, o, a はベクトルを示し、 $p \cdot n$ はベクトルの内積を示す。

(4) 座標変換等式：

$$P = A(^A B) (^B C) \text{ と } P = D(^D E)$$

($^A B$ は、座標空間 A に関する変換 B の意味)

が与えられたとき、この両方の変換を等号で結ぶことができる。

$$A(^A B) (^B C) = D(^D E)$$

この等式を $^A B$ に関して解くためには、 A^{-1} を $D(^D E)$ の前からかけ、ついで $(^B C)^{-1}$ を後からかければよい。

3.2 板金プロダクトモデルの座標系 (図4)

Fig. 4 Coordinate frames of a sheet metal part

板金プロダクトモデルを構成するすべてのプレートは独自の座標系を持ち、基準座標系に関してプレートの座標系を表現する同次座標変換行列が定義されている。例えば Plate1 に関して行列 P_1 が定義されている。同様にベンドも独自の座標系を持ち、その左右に接続されているプレートの座標系に関してベンド自身の座標系を定義する2つの同次行列が定義される。例えば図4中の Bend1 は、二つの座標変換行列 BP_1 と BP_2 を Plate1 と Plate2 の座標系に関して持つ。ベンドには、さらに曲げ加工に対応する座標変換を表現する行列 R が与えられる。この行列は、展開状態を基準にして、曲げ状態のベンドの座標系変化を表現する。この変換は曲げ軸まわりの回転変換にあたる。

3.3 曲げ回転行列の定義

曲げ回転変換 R は次の2つの要因を考慮して決められる。

(1) スプリングバック：スプリングバック¹⁾は、曲げ変換の回転角度を減らすことでシミュレーションでできる。

(2) 加工誤差：図5に示されているように、加工機械やパンチ、ダイの調整不良に起因する加工誤差は、曲げ変換座標系の y 軸方向に座標系を移動することによって取り扱うことができる。また工作物の位置決め不良に起因する加工誤差は、 z 軸周りの回転移動で、素材の板厚や加工機械の加工力のばらつきに起因する加工誤差は z 軸方向の平行移動で取り扱われる。これらの座標変換行列を D_1, D_2, D_3 とするとき、加工誤差の影響を考慮した曲げ座標変換行列 R_{new} は次の式で得ら

Fig. 5 Modification of bend's coordinate frame for simulating manufacturing errors

- (1) False adjustment of bending machines, punch and dies
- (2) False setting of workpieces
- (3) Difference in thick and forming force

れる。

$$R_{\text{new}} = (D_3)^{-1} (D_2)^{-1} (D_1)^{-1} R D_1 D_2 D_3$$

3.4 曲げ加工シミュレーション (図4)

曲げ加工シミュレーションが決定されると、システムは最初に1つのプレート (例えば Plate1) を板金の位置決めのために選択し、そのプレートを適切な位置に移動させるために、プレートの座標変換行列を変化させる。次にこのプレートとベンドを挟んで対になっているプレート (Plate2) を、曲げ作業の実行に応じて適切な位置・姿勢に変更するために、その座標変換行列 (P_2) を変化させる。そこで図4に示されている変換等式を利用して P_2 を次に示すように決定する。

$$P_2 = (BP_2)^{-1} R_{\text{new}} (BP_1) P_1$$

システムは、板金モデルを構成するすべてのプレートを bend-relation 述語を用いて検索し、以上に示した手続きに従って、その座標変換行列を1つずつ変更し、板金曲げシミュレーションを実現する。

4. プロダクトモデルに基づく 工程設計システム

4.1 システムの構成

われわれは、板金曲げ加工シミュレーションを利用した板金製品工程設計システム AMPS を開発した。システムはコモンリス言語を用いて開発され、リスバマシン上で稼動している。システムは、工程設計部とプロダクトモデル管理部の2つの部分に分かれ、工程設計部は、さらに素形材設計と曲げ作業設計のための2つのプロダクションシステムから構成されている。プロダクトモデル管理部は、曲げ加工や展開に伴う板金プロダクトモデルの変形を取り扱う機能を持っている。

4.2 工程設計手法 (図6)

システムを起動するために、機械部品の完成図にある完成板金製品のプロダクトモデルがプロダクトモ

Fig. 6 A processing flow for bending process planning

デルデータベースに用意される。AMPS はまず工程設計部の素形材決定システムを起動する。システムは完成製品のモデルに対してルールを適用し、特徴的な曲げ形状 (例えば箱状の曲げ部) の抽出や厳しい公差が指定されている寸法の抽出を行う。次にシステムは、ルールに基づいて曲げ部の展開作業を実行し、板金プロダクトモデルの形状を素形材へと変化させていく、この素形材決定段階では、必要とされる工具の決定も行われる。

このようにして決定された素形材プロダクトモデル

を用いて、曲げ作業設計システムは曲げ順序と NC 加工データの決定を行う。曲げ作業設計は、「工作物にあたる板金プロダクトモデルを、素形材の状態から完成製品の状態へと変化させていく一連の曲げ作業のシミュレーション」と定義できるので、前向きプロダクションシステムの手法を用いて計算機化した⁵⁾。システムはまず曲げ部分を決定し、工作物を位置決めし、プロダクトモデル管理部に曲げ加工シミュレーションの実行を命じる。そして次々に工作物モデルの状態を変化させ、その状態が完成製品に一致すると作業を終了する。このとき実行された一連の曲げ加工の系列が曲げ作業計画となる。曲げ加工シミュレーションにおいて、工具の干渉や公差、工作物の位置決めなどに関する拘束が評価される。

5. 工程設計拘束条件の評価

板金プロダクトモデルと曲げ加工シミュレーションを用いることによって、AMPS は、工具干渉、工具選択、公差評価、工作物の位置決め、工作物のハンドリングに関する拘束条件を評価し工程設計に利用する。

5.1 工具の干渉

曲げ工具と工作物との干渉は、板金モデルのプレートと工具形状を表現するソリッドモデルとの干渉を、ソリッドモデリングシステムの干渉検出機能を利用して検出し評価する。

5.2 工具の選択

システムは各ベンドについて、曲げ角度や曲げ半径、曲げ長さ、素材などの拘束を満たすパンチと V 金型の組合せを選択し、工具干渉を起こさない曲げ軸長さ最大のものを工具として決定する。

5.3 公差

本システムでは 3 種類の加工誤差を考慮しており、個々の加工誤差は最大値と最小値を持つ。したがって各曲げには 8 種類の曲げ変換行列が存在する。そこで、一連の曲げ作業が決定されると、モデル管理部は個々の曲げに関して 8 種類の曲げシミュレーションを実行し、公差が指定されている寸法と寸法指定に対応するプレート間の距離を比較し公差を評価する。

5.4 工作物の位置決め

曲げ作業では、工作物はプレートの端をゲージに押し当てられ位置決めされる。われわれは、押し当てられる部分の長さや曲げ部までの距離、板厚、部品の材質、ゲージに押し当てる部分の形状などと工作物の位置決め精度との関係を整理し、選択されたプレートの端が工作物を安定して位置決めできることを評価できる表を作成した。システムは、この表を参照しながら

Fig. 7 An example sheet metal part

工作物の位置決め手法を決めていく。

5.5 工作物のハンドリング

加工コストや加工時間、加工誤差を減少させるために、工作物の位置の変更はできるだけ少ないことが望ましい。システムは曲げ作業設計において、工作物の位置変更をできるだけ起こさないように曲げ部分を選択する。また工作物位置の変更回数は記録され、複数の工程計画の候補が得られた場合には、工作物の位置変更が最も少ないものを選択する。

6. 工程設計例

われわれは、AMPS を図 7 に示した例題に対して適用し、曲げ作業計画を自動生成した。図に示されている 2 つのプレートの間の寸法には公差が指定されている。図 8 (1)~(7) は、自動生成された工程計画に従って変化する工作物の様子を示す。個々の図においてパンチと V 金型に挟まれた、下側は曲げ作業実行前の工作物を、また上側は実行後の工作物を示す。

7. 結 論

本論文では、曲げ加工シミュレーションに基づいた曲げ加工自動工程設計システム AMPS について説明した。本システムでは、板金製品をプレートとベンドの集合体と考え、プロダクトモデルの枠組みの中で表現した。また、曲げ作業を板金モデルの各プレートの同次座標変換によってシミュレーションする手法を提案し、工程設計システムに組み込んだ。このシミュレーションの結果は工程設計で有効に利用される。結果としてわれわれのシステムは、複雑な板金製品の工程計画を自動決定することができた。

参 考 文 献

- 1) D. F. Eary and E. A. Reed: Techniques of Presswork.

Fig. 8 Generated bending operation sequence

- ing: Sheet Metal, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., (1958) 56.
- 2) W. Eversheim: Computer Aided Programming of NC-Machine Tools by Using the System AUTAPNC, Ann. CIRP, **31**, 1, (1982) 323.
- 3) F. Kimura et al.: A Uniform Approach to Dimensioning and Tolerancing in Product Modelling, Preprints of CAPE '86, 1, (1986) 166.
- 4) R. P. Paul: Robot Manipulator, Mathematics, Programming, and Control, The MIT Press, Cambridge, Mass., (1981) 9.
- 5) N. J. Nilsson: Principle of Artificial Intelligence, Tioga, Palo Alto, Calif., (1980) 281.