効率的な干渉判定による板金の曲げ手順の 高速な生成アルゴリズム*

安倍 宏之** 乾 正 知***

A Fast Bending Sequencing Algorithm of Sheet Metal Parts by Efficient Detection of Collisions

Hiroyuki ABE and Masatomo INUI

In the sheet metal part manufacturing, bending is the most commonly used to realize sufficient rigidity and to obtain a part of desired shape to perform a certain function. Feasible bending sequences of a sheet metal part can be determined by successively applying bending simulations to the geometric model of the part. This simulation based method is computationally expensive because huge number of sequences must be explored if a part with many bending portions is given. In this paper, the authors propose a method to accelerate the simulation based sequencing method. Complicate parts with many bending portions usually have rather small number of feasible sequences because other sequences cause self interferences or collisions with tools in the bending operation. Our method reduces the computation cost by efficiently detecting such interferences and collisions in the early stage of the sequencing process. The collision information record is introduced which enables multiple use of the collision check result computed in the prior process. The proposed method is implemented and an experimental bending sequencing program is demonstrated. This program can derive all feasible bending sequences of complex sheet metal parts in an interactive speed.

Key words: efficient collision detection, bending process planning

1. はじめに

多くの板金製品は、板金をV字型やL字型の金型に固定しプレスする曲げ加工により製造される⁴⁾。図1にV字型の金型とパンチを用いた加工例を示す。板金製品の製造工程を自動決定するためには、製品の適切な曲げ手順を計算する機能が不可欠である。板金製品の製造に最も悪影響を与えるのは、加工中の板金の自己干渉や板金と工具の干渉である。そこで本研究では、板金製品の幾何モデルに基づいて、干渉を生じないすべての曲げ手順を計算する問題を考える。得られた手順に基づいて、加工の難易度の評価や加工精度の検証などを行うことで、製品の最適な曲げ手順を決定できる。現場の技術者が工程設計する際にも、紙上で同様の作業を行っている⁹⁾。文献7)によれば、曲げ部の数が7を越す複雑な製品の工程設計には、熟練した技術者でも数日を要する。

可能な曲げ手順を計算する問題は、製品の全曲げ部を展開した状態の幾何モデルを作成し、これに曲げ加工のシミュレーションを順に施し、干渉の生じない手順をすべて探索すれば解くことができる。曲げ部の数を n とすると、可能な曲げ手順は最大 $n!$ 通り存在するので、素朴なアルゴリズムでは、曲げ部の多い製品の処理時間が膨大なものになってしまう。筆者らは、曲げ加工シミュレーションの際に製品に指定されている公差を評価し、公差が満たされない手順を途中で破棄することで探索空間を縮小するアルゴリズムを提案した²⁾。曲げ部には比較的緩やかな公差が指示されるので、公差評価だけでは探索空間はあまり縮小されない。WangとBourneは、板金の特徴的な形状に基づくヒューリスティックな制約とコスト評価を組み合わせることで、探索空間を縮小している⁷⁾。同様の手法は岡田らも提案している³⁾。しかし板金の場合には、形状特徴と曲げ手順の関係付けが困難な場合が多いため、このアルゴリズムでは正しい手順を見落とすことがある。

Fig.1 Bending method with a V-shaped die and a punch

人工知能の分野では、探索に要するコストを低減するために、階層的な探索や知的なバックトラック、過去の探索結果の再利用などの技術が開発されている⁶⁾。しかし曲げ手順の生成問題では、これらの技術は効果が期待できない。たとえばこの問題では、解の探索空間に階層性を見つけることができない。またこのような作業手順を決定する問題では、ルールの適用順序が重要なため、ATMSのような矛盾するルールの組合せに基づいて無駄なバックトラックを省く技術は、うまく機能しない。曲げシミュレーションを実行すると板金モデルが変形するため、過去に導出された探索結果をそのまま再利用することも難しい。

機械製品の組立てプラン生成の分野では、探索方法の改善ではなく、探索中に最も時間を要する部品間の干渉判定を効率化することで、高速処理を実現する技術が注目されている⁸⁾。曲げ部の多い複雑な板金製品ほど、加工中に板金や工具間に干渉を生じやすいので、曲げ部の数が増えても可能な曲げ手順はそれほど爆発的には増加しない。したがって組立てプランの生成問題と同様に、これらの干渉の有無を効率的に判定し探索空間の縮小に利用すれば、問題解決のための手間をかなり削減できる。この考え方に基いて、板金製品の可能なすべての曲げ手順を高速に生成するアルゴリズムを開

* 原稿受付 平成9年3月21日

** 学生会員 茨城大学工学部 (日立市中成沢町 4-12-1)

*** 正会員 茨城大学工学部

発したので報告する。実際にプログラムを作成し、計算実験によりアルゴリズムの有効性を検証した。なお本研究では、板金の加工法として、V字型の工具を用いて直線にそって折り曲げる方法のみを考え、丸め加工やカール加工などの特殊な方法は考慮しない。また、既に展開状態に切り抜かれた板金を曲げていくだけの工程を想定し、曲げ加工と抜き加工を併用するような作業は考えない。

次節では、本研究で用いた板金製品の幾何モデルについて説明する。3節では、曲げ手順の生成アルゴリズムの概要を説明する。4節では、板金や曲げ加工の幾何的な性質などを利用して、干渉判定を効率的におこなう手法を示す。5節では、試作した曲げ手順生成プログラムによる計算実験の結果を紹介する。

2. 板金製品の幾何モデル

曲げ加工中の板金の自己干渉や工具との干渉を判定するためには、加工にともなう板金の変形を正しく扱う必要がある。本節では、曲げによる変形を考慮した板金製品の幾何モデルについて説明する。このモデルは文献 2) と 7) に基づいている。

2.1 板金モデル

直線にそった曲げ加工では、変形は加工力が作用する曲げ軸の近傍にのみ発生し、残りの大部分の形状は変化しない。この曲げ加工の特徴に基づいて、板金製品を曲げ軸の近傍と、それ以外の変形を生じない板状の部分に分けてモデル化した。曲げ軸近傍の領域はごく狭いので、干渉判定では無視できる。そこで曲げ加工による板金製品の形状変化を、ある仮想的な軸周りを板状の薄い立体モデルが回転移動することで近似した 2)。

曲げ軸近傍では、板金の外側は引き延ばされる方向に、また内側は圧縮される方向に応力が作用する 1)。したがってこの部分の断面を考えると、応力が全く作用しない「中立面」とよばれる面が存在する。この面上では変形が生じないことから、中立面は加工前の素材の長さを維持している。このことを考慮すると、仮想的な回転軸 Ax は、図 2 に示す式を解くことで決められる。中立面の位置を示す係数 k は板金の材質や厚さによって異なるが、通常 $k = 0.3$ 程度である。図中の回転角が $\psi = 0^\circ$ であれば展開状態、 $\psi = 180 - \omega$ (ω は曲げ角度) であれば曲げ加工された状態が表現される。

以後の議論では、仮想的な回転軸をバンドとよび、板状の薄い立体モデルをプレートとよぶ。各バンドの左右には 2 枚のプレートが接続する。このバンドとプレートの接続関係はループを作らない。したがって板金モデル S は、プレートの集合 $\mathcal{P} = \{P_i\}$ と、それらを結合するバンドの集合 $\mathcal{B} = \{B_i\}$ から構成される木構造 $S = (\mathcal{P}, \mathcal{B})$ となる 7)。

2.2 座標変換による曲げ加工の扱い

板金モデル $S = (\mathcal{P}, \mathcal{B})$ の形状を表現するためには、モデルを構成するすべてのプレート $\forall P_i \in \mathcal{P}$ を、基準座標系 F_W 中の適切な場所に配置すれば良い。そこで各プレート P_i 上にプレート固有の座標系 F_{P_i} を定義し、 F_W における F_{P_i} の位置姿勢を表す同次座標変換 $H_{P_i}^W$ を与えることで P_i を位置決めする 5)。バンド B_i に 2 枚のプレート P_j と P_k が接続しているだけの単純な構造の板金モデルを用いて、各プレートの座標変換の計算手順を説明する。

まず B_i が展開状態の場合を考える。プレートと同様に、バンド B_i にも固有の座標系 F_{B_i} を与える。ただし F_{B_i} は、その z 軸が仮想的な回転軸と一致するように定義されている。 P_j の座標系 F_{P_j} における、 B_i の座標系 F_{B_i} の位置姿勢を表す同次座標変換を $H_{B_i}^{P_j}$ とする。同様に P_k の座標系 F_{P_k} における、 F_{B_i} の位置姿勢を表す座標変換を $H_{B_i}^{P_k}$ とする。これら 2 つの座標変換は製

Fig.2 Definition of the centerline of bending rotation

Fig.3 Spatial relationships between coordinate frames specified on a bend B_i and its connecting plates P_j and P_k

品の展開図から容易に得られる。 $H_{P_j}^W, H_{P_k}^W, H_{B_i}^{P_j}, H_{B_i}^{P_k}$ の間には以下の関係式が成り立つので、 $H_{P_j}^W$ か $H_{P_k}^W$ のどちらかが分かれば、他方の変換は式を変形することで計算できる。

$$H_{P_j}^W H_{B_i}^{P_j} = H_{P_k}^W H_{B_i}^{P_k} \quad (1)$$

次にバンド B_i に曲げ加工が施され、 B_i に接続する 2 枚のプレート P_j と P_k のなす角度が ω となった場合を考える。われわれのモデルでは、この変形を P_j (もしくは P_k) が、 B_i の座標系 F_{B_i} の z 軸周りを $\psi = 180 - \omega$ 回転移動することで表現する。 z 軸周りの回転変換を $\text{Rot}(z, \psi)$ と書くことにすると、座標変換間に以下の関係式が成り立つ (図 3 参照)。

$$H_{P_j}^W H_{B_i}^{P_j} = H_{P_k}^W H_{B_i}^{P_k} \text{Rot}(z, \psi) \quad (2)$$

したがって展開状態の場合と同様に、 $H_{P_j}^W$ か $H_{P_k}^W$ のどちらかが分かれば、他方の変換は式 (2) から計算できる。

一般の板金モデル $S = (\mathcal{P}, \mathcal{B})$ は、プレートの集合 $\mathcal{P}$ とバンドの集合 $\mathcal{B}$ をそれぞれ頂点と辺とする木構造である。そこでまず 1 枚のプレート $P_i \in \mathcal{P}$ を選び、 $H_{P_i}^W$ として適切な座標変換を与えることでその位置姿勢を確定する。次にバンドを介して P_i に接続する他のプレートをたどる。その際バンドが展開状態であれば式 (1)、曲げ状態であれば式 (2) を用いて、たどった先のプレートの位置姿勢を確定する。以上の処理を、すべてのプレートをたどり終えるまで繰り返せば、任意の曲げ状態の板金製品の形状が得られる。

Fig.4 Backward search tree of a sheet metal part with 4 bending portions

3. 曲げ手順の生成アルゴリズム

板金製品の曲げ手順を生成するアルゴリズムとしては、製品の展開状態の幾何モデルを入力し、バンドを一つずつ折り曲げては干渉の有無を確認し可能な手順を調べる。前向き探索に基づく方法がまず考えられる。同じことは、完成状態の幾何モデルのバンドを一つずつひろげ、可能な展開手順を調べる後ろ向き探索でも実現できる。後ろ向き探索の場合には、得られた手順の逆が曲げ手順となる。

板金製品では、完成状態に近付くほど狭い空間内にプレートが集まるので、折り曲げや展開の際に干渉が生じやすい。したがって後ろ向き探索を採用したほうが、探索の初期の段階で問題を生じる手順を検出し破棄できるので効率が良い。そこで以後は、後ろ向き探索に基づいてすべての展開手順を調べるアルゴリズムについて議論する。

n 個のバンド $B_i, i \in [0, n-1]$ からなる板金製品の全展開手順は、展開されるバンドが各辺に対応する木構造で表現できる。図4に $n=4$ の場合の木構造を示す。ただし図中の各辺には、展開されるバンド B_i の添字のみを示した。木構造の根は製品の完成状態を表し、末端の節は完全に展開された状態の板金を表す。残りの各節は、根からその節に至るまでの辺に対応するバンドを順に展開することで得られる中間状態の板金を表す。図中の節に付けられている記号や辺の濃淡の意味については後述する。

干渉を生じない展開手順を得るには、この木構造のすべての節を深さ優先の規則にしたがって探索すればよい(図4中の矢印参照)。辺を下向きにたどる時には、対応するバンドを展開し自己干渉や板金と工具の干渉を調べる。もしも干渉が検出された場合には、展開を中止しその辺以下の節の探索をやめる。逆に辺を上向きにたどる時には、対応するバンドを折り曲げ、展開前の状態を復元する。木構造の末端の節にたどりついた時、根からその節までの経路が可能なバンドの展開手順を表す。例えば図の左端の経路は、 $B_0 \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$ という手順でバンドが展開可能なことを意味する。以上の処理を繰り返すことで、干渉を生じないすべての

展開手順が得られる。

4. 効率的な干渉判定

板金モデルのバンドの一つを展開すると、前述の座標変換の手順にしたがい、モデルを構成するプレート群がそのバンドの周りを回転移動する。展開手順を高速に計算するためには、移動するプレートと他のプレートの衝突や、プレートと曲げ工具の干渉を効率的に判定する必要がある。

これらを厳密に判定するには、回転移動するプレートの掃引形状に相当する立体モデルを生成し、これと他のプレートや工具の立体モデルの交差を調べればよい。しかし掃引立体の生成には大きな手間を要するので、この方法は高速な判定には向かない。そこで本研究では、 $\psi = 0^\circ$ (展開状態)と $\psi = 180 - \omega^\circ$ (折り曲げ状態)間の幾つかの離散的な回転角 ψ において、回転移動したプレートと他のプレートや工具モデルの交差を調べる、より簡易な判定法を採用した。

4.1 幾何的な性質の利用

板金製品や曲げ加工の幾何的な性質を利用すると、干渉判定のための手間を以下のように低減できる。

最後の展開時の判定は不要： 完全に展開された状態の板金のバンドを1か所だけ曲げる加工では、加工中にプレート間の衝突や工具との干渉は生じない。したがって折れ曲がったバンドが最後に一つだけ残った状態で、そのバンドを展開する作業は必ず成功するので干渉判定は不要である。

干渉判定すべきプレートの限定： バンドは板金モデルの木構造 $S = (P, B)$ の辺にあたる。そこで S からバンド B_i を取り外すことで得られる二つの部分木 $S_j = (P_j, B_j)$ と $S_k = (P_k, B_k)$ を考える。 P_j は、 B_i に接続していた2枚のプレートの1枚と連結しているプレートの集合を表し、 P_k は、もう1枚のプレートと連結しているプレートの集合を表す。 B_i を展開すると、 P_j と P_k はそれぞれまわって回転

Fig.5 Motion of plates according to a bending operation on B_i

移動する。したがってこの展開にともなうプレート間の干渉は、 P_j のプレートと P_k のプレートの間でのみ発生する。

パンチ中心面に基づくラフチェック： 図5に、V字型のパンチを用いてバンド B_i を折り曲げる様子を示す。バンドが曲がるにつれて、 B_i の右側に接続するプレートの集合 P_j と、左側に接続するプレートの集合 P_k が、両側から回転しつつパンチの中心面 pl へ接近していく。したがってバンドが完全に折り曲げられた状態で、 P_j と P_k 中の pl を越えないプレート（図5では、 P_j 中の P_0, P_1 と、 P_k 中の P_2, P_3 ）は、曲げ加工や展開中に互いに干渉することはない。

回転半径に基づくラフチェック： 図5中のプレート P_1 と P_4 は、それぞれ図中の同心のリング状の領域 R_1 と R_4 の内部を移動する。したがってこれらの領域が重なっていなければ、プレートが干渉することはない。リング領域の重なりは、プレートの回転半径から容易に判定できる。

4.2 干渉判定結果の再利用

図4を見ると、曲げ手順の探索中に同じ干渉判定を何回も繰り返していることが分かる。たとえば探索木中の記号 α を付した節は、バンドを $B_0 \rightarrow B_1$ の順序で展開した状態の板金を表している。一方、同じ段の左から4番目の節（記号 β を付した）は、バンドを $B_1 \rightarrow B_0$ の順序で展開した板金に対応する。 B_0 を展開し次に B_1 を展開しても、先に B_1 を展開し次に B_0 を展開しても、得られる板金の形状は同じである。したがってこれらの状態で、さらにバンド B_2 や B_3 を展開した場合の干渉判定の結果も同一となる。そこで本研究では、バンドを展開する際の干渉判定の結果を記録しておき、以後、幾何的に同一な条件でのバンドの展開が要求された時には、記録してある判定結果を再利用することで、干渉判定そのものを省略することにした。

4.2.1 判定結果の再利用の効果

図4に示した展開手順の木構造を用いて、判定結果の再利用の効果を検討する。図中の各節には、対応する板金の形状を識別するために、 a （完成状態）から p （展開状態）までの記号を付した。板金の形状は、根からその節までの経路に対応する展開済みのベン

ドの組合せにより決まり、展開順序には依存しない。したがってベン

ドの組合せが同一の節には、同一の記号が付けられている。
この木構造を深さ優先で探索する時に、幾何的に同一な条件でのベン

ドの展開が繰り返される場合の、2回目以降の展開に対応する辺を灰色で表示した。このような展開では、記録されている過去の干渉判定の結果が再利用できるので、干渉判定そのものを省略できる。過去の判定結果を利用しない時には、最悪の場合、図中のすべての辺において干渉判定を行うことになるので、その回数は64回となる。一方再利用する場合には、図4中の実線の辺でのみ干渉判定が必要となるので、その回数は32回となり半減する。

判定結果の再利用による高速化の度合は、曲げ部の多い複雑な板金製品ほど顕著である。 n 個のバンドからなる板金製品の場合、その展開手順の木構造の根を0段目とすると、 i 段目の節からのびる辺は合計 $n! / (n-i-1)!$ 本となる。判定結果を再利用しない場合、干渉判定の回数 c は、木構造の辺の総数と等しいので、

$$c = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{n!}{(n-i-1)!}$$

となる。

木構造の i 段目における板金の展開状態の種類は、 n 個中の i 個のバンドを展開した場合の数と等しいので $\binom{n}{i}$ 種類となる。判定結果を再利用する場合には、それぞれの状態で残りの $n-i$ 個のバンドを展開する際に一度だけ干渉判定を行う。したがって干渉判定の回数 c' は、

$$c' = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{n!}{(n-i)! i!} (n-i) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{n!}{(n-i-1)! i!}$$

となる。

c と c' の各項を比較すれば、 $n > 2$ のとき $c > c'$ となること、また n がある程度大きくなると、 c が c' よりもはるかに大きくなることが分かる。例えば $n = 10$ の板金製品の場合、 $c = 9864100$ 回に対して $c' = 5120$ 回なので、判定結果を再利用することで2000倍近く高速化されることになる。実際には、最後のバンドの展開時の干渉判定は常に不要であり、干渉が検出され探索を途中で止めることも多いのでこれほどの差は開かないが、それでも数十倍の高速化が期待できる。

4.2.2 判定結果の記録法

最後に判定結果の記録法を検討する。干渉判定の結果を再利用するためには、任意の展開状態の板金に関する過去の判定が即座に検索できればよい。そこで板金モデルの各展開状態に対して、検索のキーとなるユニークなビット列を割り当てることにする。このようなビット列は、各バンドに0から $n-1$ までの番号を与え、展開済みのバンドの番号に対応するビットには1をセットし、それ以外のビットには0をセットすることで生成できる。複雑な板金製品でも曲げ部の総数はたかだか10程度なので、ビット列は2バイト用意すれば十分である。

途中まで展開された状態の板金モデルが与えられたときには、各バンドの展開済み / 未展開という情報から上述の手順でビット列を生成し、これをキーに記録内容を検索する。検索の結果、過去の判定結果が見つければそれを再利用する。見つからない場合には幾何計算により干渉の有無を判定し、その結果をビット列と関連付けて、将来の再利用のために記録しておく。

5. 曲げ手順生成プログラム

議論した手法に基づいて、板金製品の干渉を生じないすべての曲げ手順を算出するプログラムを、C言語を用いて実装した。実際に幾つかの板金モデルを入力し、その全曲げ手順を自動決定することで提案した手法の有効性を検証した。

図6には、実験に用いた3種類の板金製品を示した。開発したプログラムを用いて各例題を処理した結果を下表に示す。表中の最初の列は例題の曲げ部の数を示し、次の列は算出された曲げ手順の総数を示す。3列目と4列目は、それぞれ判定結果を再利用しない場合と、再利用した場合の処理に要した時間（CPU秒）を示す。なお計算には、R4600（100MHz）をCPUとする主記憶64MBのSGI Indyワークステーションを用いた。最後の列には、判定結果の再利用による計算時間短縮の比率を示した。

Table 1 Bending sequence computation results of example parts

	Number of bends	Number of seq.	Without record t_1 (s)	With record t_2 (s)	t_2/t_1
a	7	327	26.68	5.93	0.22
b	8	4704	386.65	23.75	0.061
c	10	1392	253.28	11.32	0.045

これらの結果から、複雑な板金製品の数千種類にもおよぶ曲げ手順が、対話的な利用でも支障を感じない程度の時間で計算できること、過去の判定結果の再利用により計算時間が大幅に短縮できること、短縮の度合は曲げ部の多いものほど大きいこと、などが分かる。これらの例以外にも、様々な形状の板金製品に関して評価実験を行い、いずれの場合にも満足できる結果を得た。

6. まとめと展望

本論文では、板金製品の干渉を生じない全曲げ手順を高速に算出するアルゴリズムについて議論した。このアルゴリズムは、干渉検出のための幾何計算や干渉判定の回数を低減することで、高速な処理を実現する。特に過去の干渉判定の結果を再利用することで、大幅な高速化を達成した。提案したアルゴリズムに基づいてプログラムを作成し、計算実験によりその性能を検証した。このプログラムは、曲げ部の個数が10を超える複雑な板金製品でも、対話的な利用で支障を感じない時間で全曲げ手順を生成できる。

作成したプログラムは、アルゴリズムの評価のためのプロトタイプであり、実用化のためには以下のような課題が残されている。

- (1) 現状では、V字型の金型を用いる単純な曲げ加工だけを想定している。より複雑な加工法も扱えるように、板金モデルや干渉の検出手法を拡張する必要がある。
- (2) 実際の曲げ加工では、製品の精度や加工コストなども考慮して、最適な曲げ手順を決定している。曲げ手順探索の際に、このような技術的な制約や経済的な制約も評価することで、プログラムの性能の一層の向上が期待できる。

本研究の成果を、板金製品の実用的な工程設計システムや順送金型の設計支援システムへ発展させたいと考えている。

本研究の一部は、平成7年度の天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成を受けて行われた。関係者各位に深く感謝する。

Fig 6 Example sheet metal parts

参考文献

- 1) D. F. Eary and E. A. Reed: Techniques of Pressworking: Sheet Metal, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1958).
- 2) M. Inui and F. Kimura: Design of Machining Processes with Dynamic Manipulation of Product Models, in Artificial Intelligence in Design, Springer-Verlag, London (1991) 195.
- 3) 岡田公治, 渡部謙三, 荒井信一, 松崎吉衛, 北沢 浩: 板金 CAD/COST システムの開発 (第1報) - システムの構成 -, 1995 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1995) 25.
- 4) 大久保正雄, 塩川昌男, 三坂浩和: 5 章プレス加工, 自動車の製造法, 自動車工学全書 19, 山海堂 (1980) 113.
- 5) R. P. Paul: Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, The MIT Press, Cambridge (1981).
- 6) R. Reddy et al.: Symposium on Artificial Intelligence, ACM Computing Surveys, 27, 3 (1995) 301.
- 7) C. H. Wang and D. A. Bourne: Using Features and Their Constraints to Aid Process Planning of Sheet Metal Parts, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (1995) 1020.
- 8) R. H. Wilson and J.-C. Latombe: Geometric Reasoning about Mechanical Assembly, in Algorithmic Foundations of Robotics, A K Peters, Wellesley (1995) 203.
- 9) 山口文雄: 順送型設計の基礎から応用まで, 型技術, 12, 7 (1997) 98.