

# 曲げ順送加工の工程設計自動化に関する研究

茨城大学工学部システム工学科

助教授 乾 正知

(平成 9 年度研究開発助成 AF-97013)

キーワード：順送加工，自動工程設計

## 1 研究の目的と背景

一方向に送られる帯状の板金に、抜き加工と曲げ加工を順に施し製品を得る製造法を、プレス順送加工とよぶ。この加工法は、素材から最終製品を直接得ることができるため、板金製品の大量生産によく用いられる。図 1 にプレス順送加工の工程例を示す。まず帯状の板金に抜き加工を用いて適切な穴をあけ、得られた舌状の部分に曲げ加工を施して形状を製品へ近づけていく。複雑な製品の場合には、抜き加工と曲げ加工が交互に何回も繰り返される。十分に成形された板金を、最後に抜き加工でキャリアから切り放し製品を得る。製品の面のうち、最後までキャリアと接続している部分の上側の面を基準面とよぶ。

プレス順送加工の工程設計は、帯状の板金への展開形状の配置、基準面の選択、曲げ加工手順決定、抜き加工手順決定の順に進められる [1]。これらの作業のうち、展開形状の配置は既に自動化されている。また基準面

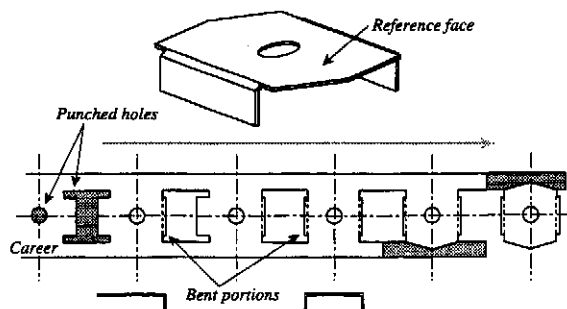


図 1: プレス順送加工のストリップレイアウト (=加工工程) の例

と曲げ加工手順が得られれば、抜き加工手順の決定は容易である。そこで本研究では、板金製品の幾何モデルに基づいて、適切な(すなわち、物理的に実現可能でコスト的にも許容できる)基準面と曲げ加工手順を、自動決定する問題を考える。得られた結果に基づいて、特殊な加工法の検討や加工精度の検証などを行うことで、製品の最適な基準面と曲げ加工手順を決定できる。

プレス順送加工では、曲げ加工が施される部分の形状は、幾つかの製造上の制約を満たす必要がある。この制約を考慮すると、板金部品の位相的な条件に基づいて、可能な曲げ加工手順を探索の初期の段階に絞り込むことができる。曲げ加工手順の探索中には、幾何的に同一な条件での干渉判定が何回も繰り返される。そこで最初の判定の際に結果を記録しておき、2回目以降の判定では記録してある結果をそのまま再利用することで、処理を高速化する。平行かつ基準面に関して対称な二つの部分を同時に曲げると、板金に作用する力のバランスをとることができるので、製品の精度が向上する。曲げ加工手順を探索する際に、この同時曲げを考慮することで、探索空間をさらに縮小できる。これらの技術により、プレス順送加工用の基準面と曲げ加工手順を高速に計算するアルゴリズムを開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。

## 2 曲げ加工と板金モデル

プレス順送加工では、板金の基準面を材料押さえと金型を用いて上下から挟み固定し、降下するパンチではみ出ている部分を折り曲げる。これを下曲げとよぶ [1]。90°を越える曲げや特殊形状の生成には、専用の手順や装置が用いられるが、通常は図 2 に示した L 曲げと V 曲げを色々な順序で適用することで、希望形状を

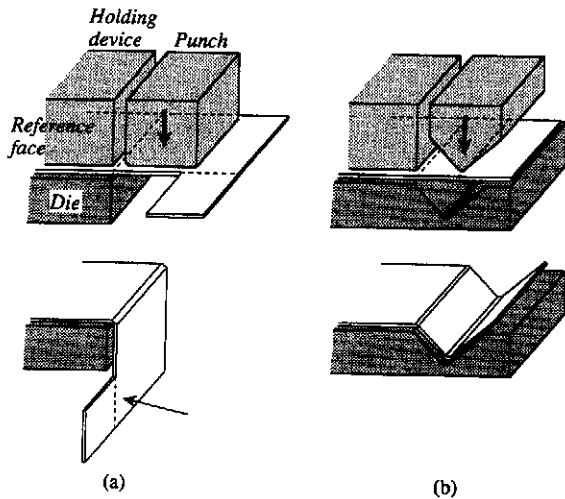


図 2: L 曲げ (a) と V 曲げ (b) の例

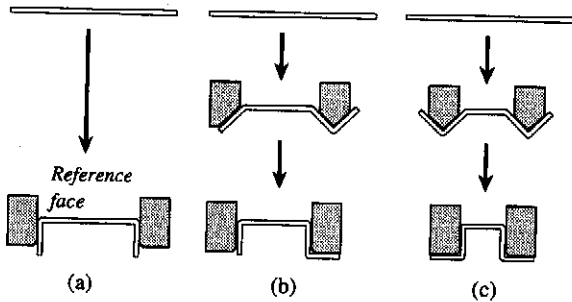


図 3: 同時曲げの例

得る。挟み込んだ板金を下側に固定されたパンチへ押し付けることで、板金を上向きに曲げることもできる。このような上曲げの場合には、金型の構造が複雑になるため、加工コストの増加が避けられない。

曲げ加工では、パンチの移動方向へ材料が引っ張られるため、加工中に板金の位置がずれ、製品に寸法誤差を生じることがある。このような問題を避けるために、基準面に関してほぼ対称な位置にある 2 本の平行な曲げ部を同時に折り曲げ、加工力の釣合いをとることが多い。図 3 によく用いられる同時曲げの工程例を示す。工程例 (b) のように、左右の曲げ部に適用される曲げ加工の回数をそろえるために、一つの曲げ部を 2 回の部分的な L 曲げに分けて加工することもある。

L 曲げや V 曲げのような直線にそった曲げ加工では、

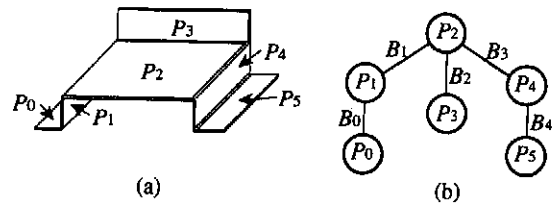


図 4: 板金部品の例 (a) と対応するプレートとベンドの木構造 (b)

板金の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。曲げ軸近傍の領域はごく狭いので無視し、板金製品の形状を、変形を生じない板状の部分を表す薄い立体モデルの集合としてモデル化した。ある仮想的な軸周りを板状の立体モデルが回転移動することで、曲げ加工による形状変化を近似表現する [3]。以下の議論では、仮想的な回転軸をベンド、板状の立体モデルをプレートとよぶ。各ベンドの左右には 2 枚のプレートが接続する。またプレートとベンドの接続関係は閉路を作らない。したがって板金の幾何モデル  $S$  は、プレートの集合  $P = \{P_i\}$  を節、それらを結合するベンドの集合  $B = \{B_i\}$  を辺とする木構造  $S = (P, B)$  となる [2]。図 4(b) には、同図 (a) の板金製品に対応する木構造を描いた。

### 3 工程設計アルゴリズム

プレス順送加工のための適切な基準面と曲げ加工手順は、以下のアルゴリズムにより計算できる。

**Step 1** 板金製品の幾何モデルを利用して基準面の候補を選択する。

**Step 2** 基準面の各候補を金型上に位置決めし、工具干渉を生じないすべての曲げ加工手順を計算する。

**Step 3** 工程の全長が製造コストに最も大きな影響を与える。そこで、得られた加工手順の中で、曲げ加工の工程数が最短の手順と対応する基準面を解として出力する。

Step 2 の曲げ加工手順の計算には、以下の二つの方法が考えられる。

前向き探索 展開状態の板金モデルを入力し、L 曲げや V 曲げによりベンドを一つずつ折り曲げては工具干渉の有無などを確認し、可能な曲げ手順を探索する。

後ろ向き探索 完成状態の板金モデルのベンドを、曲げ加工の逆操作にあたる方法で一つずつひろげ、可能な展開手順を探索する。得られた展開手順の逆が曲げ手順となる。

板金製品では、完成状態に近づくほど狭い空間内にプレートが密に集まるので、加工中に工具干渉が生じやすい。したがって後ろ向き探索を用いるほうが、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。

## 4 展開手順の探索の高速化

後ろ向き探索に基づく素朴なアルゴリズムでは、膨大な数の展開手順を探索する必要が生じるため、曲げ加工手順を高速に決定することができない。この探索処理を高速化するために、本研究では以下に示す三つの技術を提案する。

### 4.1 製造上の制約の利用

曲げ加工の方法を L 曲げと V 曲げの 2 種類に限定すると、これらの加工法の製造上の制約により、製品の可能な展開手順を探索の初期の段階に絞り込むことができる。図 2 に示した加工例から明らかのように、L 曲げや V 曲げを実行するためには、加工前の曲げ部が基準面と同一平面上に存在する必要がある。したがって同図 (a) のような L 曲げを実行すると、折り曲げられたプレートに接続する基準面とは異なる側の曲げ部（図中の矢印で示した曲げ部）が、基準面からずれた位置へ移動するため、通常の方法では以後加工できなくなってしまう。

このような問題を避けるには、基準面から「遠い」ベンドから順に曲げていけばよい。まず基準面から各ベンドまでの距離を、以下の方法で定義する。2 節で述べたように、板金モデルのプレートとベンドは、プレートを節、ベンドを辺とする木構造を構成する。基準面に対応するプレートを、この木構造の根と見なす。この根プレートからその他の各プレートまで、木構造を下

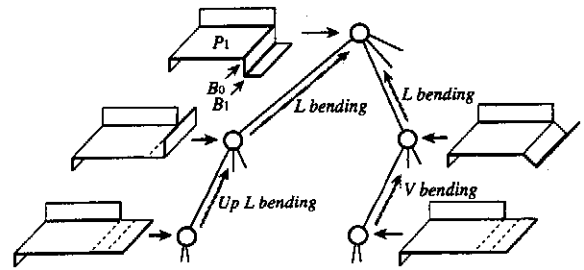


図 5: 展開手順の探索木の一部と各ノードに対応する板金部品の形状

向きにたどる経路を考える。得られた各経路上のベンドの列を、基準面から列の最後のベンド  $B_i$  までの位相的な距離  $d(B_i)$  と定義する。

図 4 の板金モデルにおいて、 $P_2$  を基準面に対応するプレートとして選択した場合を考える。 $P_2$  からプレート  $P_0$  までの経路上のベンドの列は  $[B_1, B_0]$  なので、列の最後のベンド  $B_0$  までの位相的な距離は、 $d(B_0) = [B_1, B_0]$  となる。同様にして、基準面から他のベンドまでの位相的な距離を計算すると、 $d(B_1) = [B_1]$ 、 $d(B_2) = [B_2]$ 、 $d(B_3) = [B_3]$ 、 $d(B_4) = [B_3, B_4]$  となる。

ベンド  $B_i$  の位相的な距離  $d(B_i)$  が、ベンド  $B_j$  の位相的な距離  $d(B_j)$  の部分列であるとき、「 $B_j$  は  $B_i$  よりも基準面から位相的に遠い」と定義する。上述した例では、 $d(B_1)$  は  $d(B_0)$  の部分列なので、ベンド  $B_0$  は  $B_1$  よりも基準面から遠いことになる。ベンド間の位相的な遠近関係に基づいて、基準面から遠いベンドから順に曲げていけば、上述したような製造上の問題を回避できる。展開手順の探索では、逆に位相的に近いベンドから展開していけばよい。

### 4.2 干渉判定結果の再利用

展開手順の探索中には、幾何的に同一な条件での干渉判定が何回も繰り返される。図 5 に、プレート  $P_1$  を基準面として金型上に固定し、後ろ向きに展開手順を探索する場合の探索木の一部と、各節に対応する板金モデルの形状を示す。図の左側の枝は、ベンド  $B_0$  と  $B_1$  を順に L 曲げの逆操作を用いて展開した場合の、板金モデルの形状変化を表している。一方右側は、同じベンドを L 曲げと V 曲げの逆操作を用いて展開した場合の、板金モデルの形状変化を表す。図から明らかかなよ

うに、二つの展開手順のどちらを用いても、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、さらに残りのバンド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そのまま再利用することにした。再利用により、手間にかかる幾何計算の回数を減らせるので、結果として展開手順の探索を高速化できる。これは、われわれが論文[3]に報告した手法を、プレス順送加工用に拡張したものである。

### 4.3 同時曲げの利用

本研究では、製造コストの評価基準として工程数を用いる。同時曲げを用いることで、曲げ加工の工程数を確実に減らすことができる。したがって、同時曲げを用いる加工手順のコストは、同時曲げを用いない手順のコストを必ず下回る。そこで同時曲げを用いる手順を優先的に探索し、そのような手順が存在しない場合にのみ、他の手順を探索するようにアルゴリズムを変更することで、探索の手間を大幅に削減できる。

二つのバンドの基準面からの位相的な距離の間に遠近関係が定義できる場合には、それらの曲げ順序は遠近関係にしたがう必要があるので、同時に曲げることはできない。また同時曲げを適用する二つのバンドは、加工力の釣合いをとるために、互いに平行でしかも基準面に関して対称な位置に存在する必要がある。そこで基準面の候補を選択する際に、まずその面とすべてのバンド間の位相的な距離を計算する。もしもどのようなバンドの組を選んで、それらの間に遠近関係が定義できる場合には、同時曲げ可能なバンドの組は存在しないことになる。また遠近関係を持たないバンドの組が存在する場合でも、それらの位置が上述した「基準面に関して対称かつ互いに平行」という条件を満たさない場合には、やはり同時曲げは不可能となる。以上のような場合には、その面を基準面とする展開手順の探索を取り止め、同時曲げが可能な基準面に関する展開手順の探索を先におこなう。

本研究では、利用可能な同時曲げを、図3に示した3種類にとりあえず限定する。ただし将来、利用可能な同時曲げの種類を拡張することは容易である。各同時

曲げは、複数のバンドを一度に曲げる特殊な操作として、一つにまとめて扱うことにする。すなわち図3に示した同時曲げは、(a)2個のL曲げ、(b)3個のL曲げと1個のV曲げ、(c)2個のL曲げと2個のV曲げ、を同時に実行する曲げ操作として、まとめて扱う。そして図の下段の折り曲げられた状態から、最上段の展開状態が一度に得られるものと考えて、展開手順の探索をおこなう。このような扱いにより、同時曲げを構成するL曲げやV曲げ間の適用順序を考慮する手間が省けるので、展開手順の探索をさらに高速化できる。

表 1: 曲げ手順の自動工程設計の結果

	Number of bends	Number of seq.	Bending steps	Computation time (s)
a	7	4	4	1.13
b	7	2	5	1.09
c	8	12	6	5.44
d	9	10	7	15.83

## 5 計算実験の結果

提案した手法に基づいて、プレス順送加工のための基準面と曲げ加工手順を計算するプログラムを、C言語を用いて実装した。実際に幾つかの板金製品のモデルを入力し、それらを製造するための最適な基準面と曲げ加工手順を自動決定することで、手法の有効性を検証した。表1に処理結果を示す。表中の最初の列は例題のバンドの数を示し、次の列は算出された適切な曲げ加工手順（工程数と上曲げの回数が最小の手順）の総数を示す。3列目は曲げ加工の工程数を、また4列目は処理に要した時間（CPU秒）を示す。計算には、R5000（180MHz）をCPUとする主記憶64MBのSGI社製O2ワークステーションを用いた。これらの結果から、複雑な板金製品の基準面と曲げ加工手順が、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が分かる。図6に、表中の部品cを製造するための基準面と曲げ加工手順の計算結果の一つを示す。図中の色の濃い面が基準面を表す。

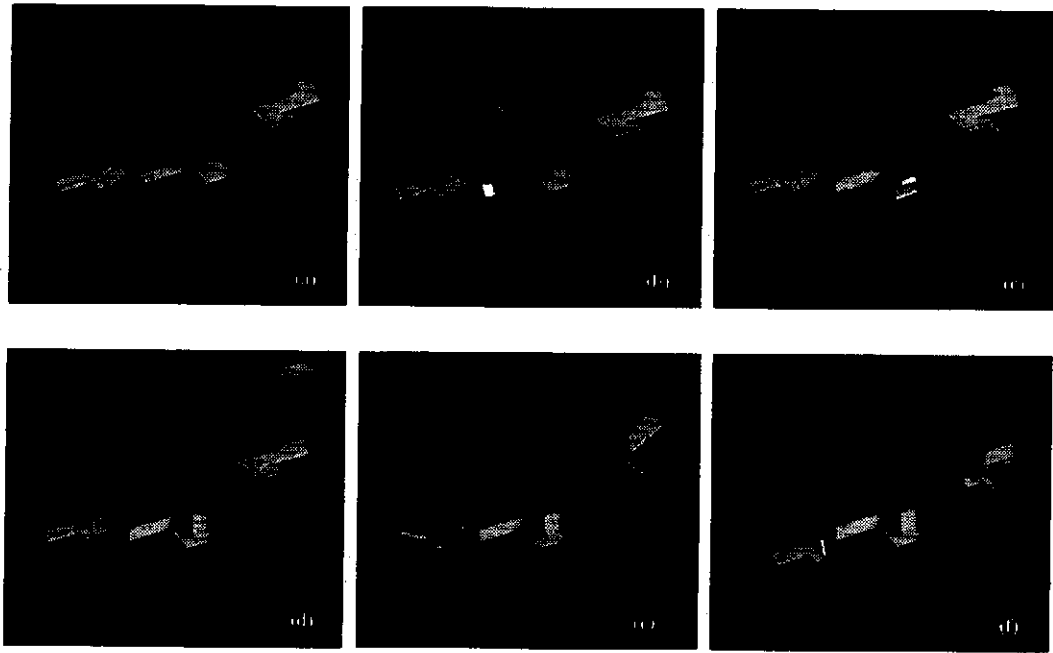


図 6: 自動決定された最適な基準面と曲げ手順の例

## 6 結び

本研究では、プレス順送加工のための適切な基準面と曲げ加工手順を自動決定するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、製造上の制約の利用、干渉判定の効率化、同時曲げの考慮により、曲げ加工手順の高速な探索を実現する。工程設計の完全な自動化のためには、さらに以下に示す課題を解決する必要がある。

1. 特殊な形状を作成するための専用加工法なども扱えるように、手法を拡張する必要がある。
2. 精密な部品を製作するためには、加工中に発生する板金の「はね上がり」や「引かれ」とよばれる変形を考慮した工程設計をおこなう必要がある。

3. 得られた基準面と曲げ加工手順に基づいて、抜き加工の手順とそのためのパンチの形状を自動決定するアルゴリズムを開発する必要がある。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 安倍宏之, 乾 正知: 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, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1263.