

ロボットによる板金曲げ加工工程設計の自動化と最適化

東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

助教授 青村 茂

(平成10年度 研究開発助成AF-98013)

キーワード：曲げ工程設計, 把持位置, 持ち換え

1. 緒言

近年, 板金加工では, 人間の作業者に代わりロボットによるハンドリングが増えつつある(図1)。ハンドリングが作業員からロボットに移行することで曲げ工程の設計は非常に煩雑になる。作業員を対象とした工程設計では, 主として板金部品の幾何的な干渉条件に基づいてパンチとダイの選定と曲げ順序の決定を行う¹⁾。しかし, ロボットによる作業の場合, 作業員が加工中にあまり意識しなかった材料の把持位置や掴み換えを詳細に指定する必要が生じる。従って, ロボット曲げ加工を対象とした工程設計では, n 回の曲げに対して理論的には $n!$ 通り存在する曲げ順序の探索空間の中で実行可能な曲げ順序を求め, それぞれの順序に対して適切な把持位置と掴み換えのタイミングを決め, さらにその中から掴み換え回数が少なく, 材料撓みの小さい工程を選択する必要がある。

曲げ順序の生成問題では, 乾らがすべての曲げ順序をツリーで表現して曲げ時の干渉条件を解析し, 干渉条件を満たされない曲げ順序を途中で破棄することで解の探索空間を縮小するアルゴリズムを提案している²⁾。この手法により, 実行可能な曲げ順序の探索に要する計算時間は短縮されるが, これらの研究はロボット曲げ加工を対象としていない。Wangら³⁾は, ハット形状やサッシ形状といった形状により曲げ順序や金型が決まる板金部品の形状特徴に基づいたヒューリスティックな制約条件により探索空間を縮小し, コストとして生産時間に着目して生成された工程の評価を行った。しかし, この手法では熟練した設計

者の知識や経験が基盤となるため, 板金部品の曲げ工程と形状特徴の関連付けが複雑になり, 解として成立している手順をも見落とす可能性がある。一方, Zussmanら⁴⁾は板金部品のロボットハンドリングに関して, C-Spaceとポテンシャル場を用いて形状の複雑な板金部品の搬送軌道を生成する手法を提案しているが工程設計に関しては言及していない。

生産の効率化を目指し, ロボットによる曲げ加工が増える中で, 工程設計の自動化が求められている。そこで本研究では, 形状特徴であるチャンネル形状⁵⁾に着目し, さらに複雑な形状特徴にも対応できる曲げ順序生成ルールを適用して, 工程を自動生成する手法を提案する。提案した手法に基づき計算機上にシステムを構築し, 実際に工場で加工された標準モデル多数について工程を自動生成した。そして, 検証の結果, 期待された効果が認められたのでここに報告する。

2. 板金モデルと加工ツール

2.1 板金モデル

最終形状と展開状態の板金モデルを図2に示す。本研究では図2(b)に示すように稜線($e_i; i=1, 2, \dots, n$)を外形線分(実線)と曲げ線分(破線)とに区別して呼ぶ。そして,

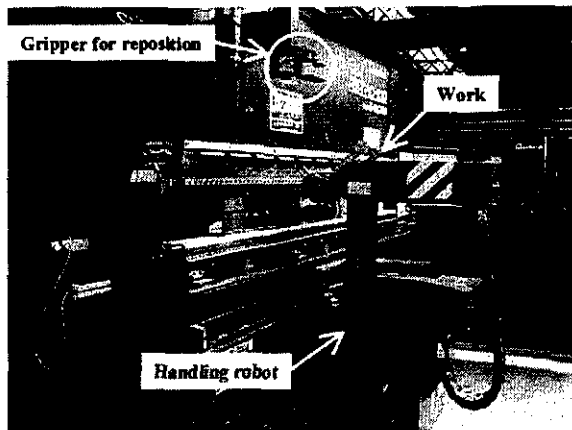
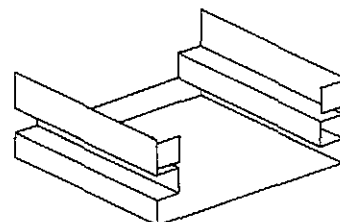
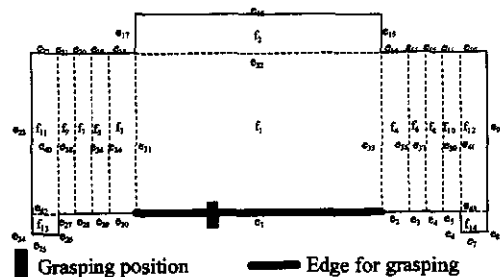


Fig.1 Press brake with handling robot



(a) Final shape



(b) Flat pattern

Fig.2 Sheet metal part model

把持位置は外形線分上の一点で表現し、把持位置を含む外形線分を把持線分と呼ぶ。さらに展開図を曲げ線分により複数の領域に分割したとき、最小ループに分割されるこれらの領域を曲げ面($f_i : i = 1, 2, \dots, m$)と呼び、把持位置と把持線分とを含む曲げ面を把持面と呼ぶ。曲げ線分の曲げ角度は順手の把持に対して山折を正、谷折を負とし、その範囲は $-180^\circ \sim +180^\circ$ までとする。なお、本研究で対象とする板金モデルの形状は曲げ線分が互いにすべて垂直、水平関係にあり、また穴内部にタブを有するモデルは対象としない。また、本手法による工程生成では金型の種類や長さによる制限は考えない。すなわち、複数の組み合わせにより実用上必要な種類、長さの金型を用いることができるものとする。

2.2 基準平面の定義

ロボット曲げ加工では3次元空間内を板金部品が移動するので、加工途中の板金部品の形状や把持位置に対する各曲げ面の状態を表現するための基準が必要になる。そこで本研究では、把持面を含む平面を基準平面と定義する。

2.3 ロボットグリッパの仕様

グリッパの多くは図3に示すように高さ h 、深さ d を持ち、曲げた面を跨いで把持することが可能である。これらの値はグリッパにより決められている。

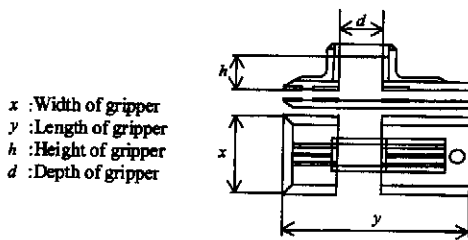


Fig.3 Dimension of gripper

3. 加工上の制約と工程生成ルール

3.1 金型とグリッパの干渉回避

材料を曲げる時には把持位置に対してグリッパと金型の干渉を回避するための余裕が必要である。把持線分と曲げ線分の関係が平行なときの曲げ線分と把持位置の距離を l_{dh} (図4(a))、垂直なときを l_{dv} (図4(b))とする。

ロボットのグリッパには材料の掴み量 l_g (垂直なときは $x/2$) と、干渉を回避するための各把持の方向に対して余裕限度 l_{ch} 、 l_{cv} が予め定められている。そして、グリッパと金型が干渉を回避するためには各把持の方向に対して(1)、(2)式を満たす必要がある。

$$l_{dv} \leq l_{cv} + \frac{x}{2} \quad (1)$$

$$l_{dh} \geq l_{ch} + l_g \quad (2)$$

ここで x は図3に示されるグリッパ幅である。

3.2 板金部品接続グラフ

掴み換えや曲げ順序を決めるときに様々な制約を解決す

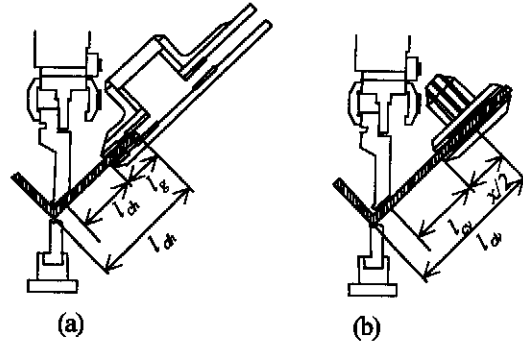
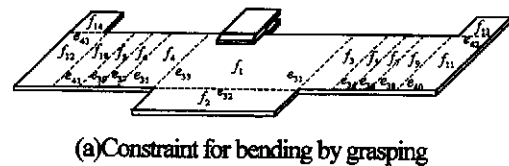
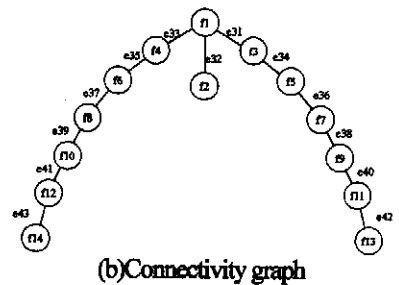


Fig.4 Clearance between gripper and tool

るために、本研究では把持面を基準とした板金部品接続グラフと、それにより決定される曲げ線分の「位相的距離」を定義する。図2に示した板金部品の f_1 を把持したとき(図5(a))の板金部品接続グラフ G を図5(b)に示す。板金部品接続グラフ G は把持面をルートノード、曲げ面をノード、曲げ線分をエッジとして生成する。次に、把持面から曲げ線分までの「位相的距離」を決定する。このグラフ G のルートノードから各曲げ線分に相当するエッジを下向きに辿る経路を考え、経路上のエッジ列を得る。そして得られたエッジ列を曲げ線分 e_i までの「位相的距離」 $d(e_i) = [e_i, e_j, \dots]$ とする。二つの曲げ線分の $d(e_i)$ と $d(e_j)$ を比較し、 $d(e_j)$ が $d(e_i)$ の部分列であるとき「 e_j は e_i よりも把持面から遠い」とする^[9]。



(a)Constraint for bending by grasping



(b)Connectivity graph

Fig.5 Constraint for bending and connected graph

3.2.1 掴み換えの制約

ロボットの取り得る姿勢の制限により、曲げていない曲げ線分が基準平面から外れた状態で掴み換えは行わない。その際にはグラフ G を参照し、ある曲げ線分より「位相的距離」が遠い曲げ線分が曲げられていないとき、その曲げ線分は曲げないで掴み換えを行う。新たな把持位置の探索は、ロボットの制限から通例基準平面内で探索する。

3.2.2 形状特徴を考慮した曲げ順序の決定

曲げ順序を決定する際に、基本的には把持面に対して「位相的距離」が遠い曲げ線分から曲げる。人間が加工する場合には、チャンネル形状(図6(a))やハット形状(図6(b))、その

他(サッシ形状,かまち形状等...)の特定の形状特徴においては,この法則に従わない経験的な曲げ順序が予め定められている¹⁴⁾。しかし,ロボット曲げ加工の場合には,この順序に従うとチャンネル,ハット以外の形状特徴では掴み換えが必要となり,予め一連の手順で曲げ順序を決めておくことが困難となる。この解決手段として掴み換えを必要としない最も基本的な形状特徴であるチャンネルを応用した曲げ順序の決定方法を用いる。以下にチャンネルとそれに基づく曲げ順序の決め方を説明する。

(1)チャンネル

チャンネルとは図 6(a)のようにすべてが互いに平行な曲げ線分で構成されている4つの曲げ面を考えたとき f_1 と f_3 が平行で,把持面を基準としたとき山折を正,谷折を負として曲げ角度の符号列をとり,それが(−++)または(+−−)となるものをいう。

(2)チャンネルを利用した曲げ順序の決定

・チャンネルの抽出

まず,グラフ G のリーフノードからルートノードへ上向きに辿った経路で構成される部分グラフ S を作成する。このとき S のルートノードはグラフ G のルートノードと同じになる。次に,部分グラフ S のルートノードから下向きに4つのノードをとった部分グラフ T を得る。さらに展開図の曲げ線分,曲げ角度を参照し,部分グラフ T のノードに対応する曲げ面がチャンネルに該当するかを判定する。この操作を出発点を1つずつ下にずらしてグラフ S のリーフノードに至るまで続け,ステップ3の操作で,さらにチャンネルを抽出する。

・曲げ順序の決定

まず,把持面より位相的距離の近いチャンネルから曲げる。次にチャンネルでは,図 6(a)の e_2, e_1, e_3 の順番で曲げる。 e_3 より遠い曲げ線分があるとき e_3 は曲げず,それらを遠い順番で曲げ,最後に e_3 を曲げる。

図 6(b)(c)を例にチャンネルを含む板金部品の曲げ順序の決定方法を説明する。図 6(b)のハットでは抽出されるチ

ャネルは $C = [f_1, f_2, f_3, f_4]$ であるので, C の曲げ線分 e_2, e_1 の順番に曲げ,残りの曲げ線分を「位相的距離」の遠い順番に e_4, e_3 と曲げる。従ってハットは e_2, e_1, e_4, e_3 と曲げ順序が決まる。

図 6(c)は複数のチャンネルを含む板金部品の例である。把持面 f_1 を基準として抽出されるチャンネルは $C_1 = [f_1, f_2, f_3, f_4]$ と $C_2 = [f_3, f_4, f_5, f_6]$ になる。はじめに把持面に近いチャンネルから曲げるので C_1 の e_2, e_1 と曲げ,次に C_2 の e_4, e_3 と曲げ,最後に残りの曲げ線分を「位相的距離」の遠い順番に e_6, e_5 と曲げる。よって曲げ順序は $e_2, e_1, e_4, e_3, e_6, e_5$ となる。

以上の例で分かるように互いに平行な曲げ線分で構成される板金部品に対してチャンネルを利用することで一意に曲げ順序を定めることができる。

3.3 グリッパの把持における制約

掴み換えの把持位置は,基準平面内にあるまだ曲げられていない曲げ面の中から探索する。すでに曲げられたところは,グリッパが跨いで掴めるときしか掴み換えができない(図 7)。掴み換えの際には図 3 の h と d を基に板金部品の曲げ部とグリッパの跨ぎ部の干渉判定を行う。

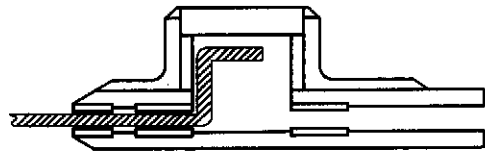


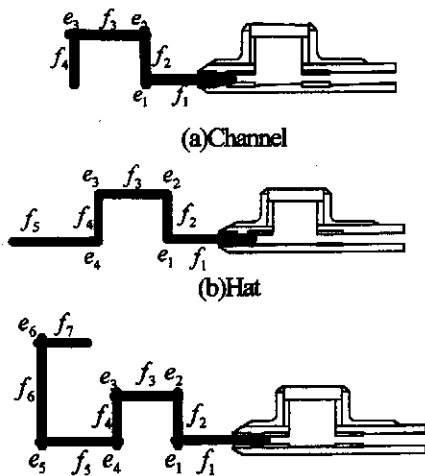
Fig.7 Gripping of sheet metal beyond a flange

4. 工程生成の手法

図 8 に工程生成の概略処理を示し, (1)把持位置候補の探索, (2)曲げ可能線分の探索, (3)曲げ順序の決定, (4)掴み換え把持位置候補の探索に従って, 要点を説明する。

4.1 把持位置候補の探索

まず展開図の重心から外形線分に対して法線を引き, 交点が存在するとき, これらの外形線分を把持線分候補 ($g_i : i = 1, 2, \dots, n$) として決定する。次に求めた法線と



(c)Sheet metal part with channels

Fig.6 Feature of sheet metals

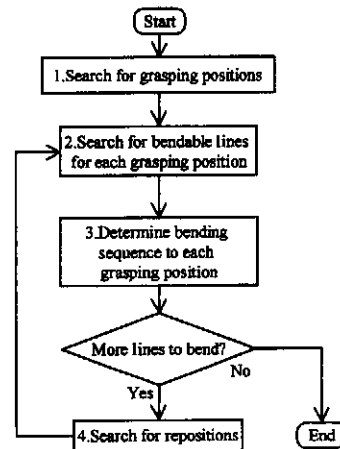


Fig.8 Flow diagram for generating bending sequence

の交点をすべて把持位置候補 ($p_i : i = 1, 2, \dots, n$) とする。そして展開図中のすべての曲げ線分に対し距離が $l_{cv} + \gamma/2$ の平行線を引き、これらの平行線と g_i との交点をすべて新たな把持位置候補として加える。

($p_i : i = 1, 2, \dots, n, n+1, \dots, n+m$)

4.2 曲げ可能線分の探索

本研究では、ある把持位置 p_j に対する曲げ線分が 3.1 節の金型とグリッパの干渉と 3.2.1 節の掘み換えの制約を満たすとき、これを曲げ可能線分と定める。多くの場合、 p_j に対する曲げ可能線分は複数存在するので、曲げ可能線分の集合 $B_a = \{e_i : i = 1, 2, \dots, r\}$ を求める。

ステップ1: 把持線分候補の中から重心までの距離が最も近い g_i を選択し、その g_i の中でさらに最も重心に近い把持位置候補 p_j を選択する。

一般に把持位置と重心との距離が小さければ撓みも小さいので、重心からの距離が小さい把持位置候補を決めて、それに対する曲げ可能線分を求め、比較的材料的撓みが小さい工程を優先的に生成する。

ステップ2: ステップ1で選択した p_j に対して展開図中の曲げ線分をひとつ選択し、把持線分 g_i と曲げ線分の間隔関係を調べ、その曲げ線分と p_j の距離 l_{dh} または l_{dv} を求める。この l_{dh} 、 l_{dv} に対して(1)または(2)式を満たすとき、3.1 節の制約条件を満たした曲げ線分とする。

ステップ3: ステップ2の処理を展開図中のすべての曲げ線分に対して行い、 p_j を把持したときに 3.1 節の制約条件を満たした曲げ線分を集合 B_a の要素に加える。

ステップ4: 求められた p_j から把持面を決め、 p_j に対する板金部品接続グラフを作成する。このグラフに基づき B_a に属する曲げ線分 e_k に対して e_k よりも「位相的距離」が遠い曲げ線分 e_l が存在するかを調べる。集合 B_a に属さない e_l が存在する場合、 e_k は p_j を把持したときに曲げられない曲げ線分とし、集合 B_a から e_k を除外する。この場合、 e_k は曲げられていない e_l が基準平面を離れてしまう曲げ線分になり、3.2.1 節の条件に反する。

以上の操作により集合 B_a に残った曲げ線分が p_j を把持したときの曲げ可能線分となる。

4.3 曲げ順序の決定

4.1 節で求めた把持線分に対して具体的な曲げ順序を求める。曲げ可能線分の中でチャンネルを抽出し、3.2.2 節の手順に従って曲げ順序を定める。この手法に基づくと板金部品接続グラフのリーフノードからルートノードに至る曲げ順序に関しては一意に求めることができるが、一般に図 5(b)に示されるように、板金部品接続グラフは幾つかの枝分かれを持つ(図 5(b)の e_{31} 、 e_{32} 、 e_{33})。このように深さが同じ曲げ線分に対しては一意に曲げ順序を求めず、それらの順列すべてを曲げ順序として求め、後に干渉判定により実行の可能性を検証する。

4.4 掘み換え位置の探索

把持位置候補 p_j に対して曲げられない曲げ線分が展開図中にあるとき掘み換える新たな把持位置候補が必要に

なる。まず最初に把持位置 p_j の曲げ可能線分をすべて曲げる。次に曲げにより基準平面内から外れた曲げ面をすべて取り除き、展開図から削除する。曲げられた曲げ線分は新たに外形線分とする。次に曲げられた曲げ面を取り除くときは 3.3 節の手法によりグリッパとの干渉判定を行う。最後に修正された展開図の中から、4.1 節、4.2 節の手順で把持位置候補を選択し、その候補に対する新たな曲げ可能線分の集合を求める。

以上、4.1 節から 4.4 節までの処理を繰り返し続け、展開図から曲げ線分がなくなった時、工程の生成を終了する。

残りの把持線分候補と把持位置候補に対しても以上の操作を繰り返し、すべての工程を探索して、掘み換える回数が少ない順番に並べる。

5. 数値計算例と考察

5.1 板金モデルとシミュレーション

企業の現場で用いられている標準的なロボット曲げ加工用の板金モデル 106 題を入手し、それらのうち展開図内部にタブを有するモデルと、互いの曲げ線分の角度が水平または垂直でないモデルをシミュレーションの対象から外し、その結果シミュレーションが可能なモデルは 97 題をシミュレーションの対象モデルとした。なお、適用モデル 97 題すべてについて工程設計者による現実的な工程が与えられており検証用としては最適であった。板金モデルのシミュレーション結果について、

グループ1: 工程設計者と同じ工程を得たモデル(53 題)、

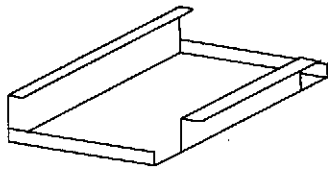
グループ2: 把持位置は一致するが掘み換えるタイミングが異なるモデル (27 題)、

グループ3: 設計者と同じ工程を得ないモデル(17 題)、

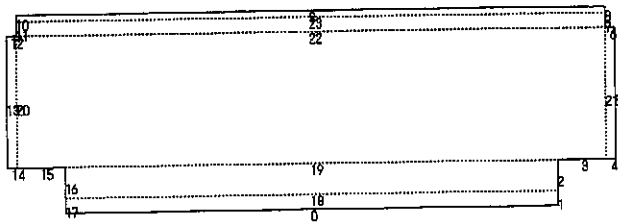
の3つのグループに分類し、結果についてモデルの曲げ線分の本数別分布と工程生成の成功率を考察した。この結果、板金部品の曲げ線分本数は 6~9 本のあたりに集中し、生成結果は曲げ線分の本数に依存しないことが分かった。

グループ1から3の特徴に基づく4つのモデルを図9~図12に示す。各図はそれぞれ(a)部品形状、(b)展開図、(c)工程生成結果を示している。モデル1ならびにモデル2はグループ1に該当するモデルである。モデル3は、グループ2に該当するモデルで掘み換えるタイミングが一致しない。モデル4はグループ3に該当するモデルである。

図9のモデル1を例に結果の説明をする。図9(c)のNo.欄は工程の整理番号で、No.欄が h のところは設計者の工程である。GP欄は初期把持線分を示し $Rpo.1$ 、 $Rpo.2$ 、 $Rpo.3$...はそれぞれ掘み換えによる新たな把持線分を表す。工程はNo.欄、GP欄...と横方向に辿って表されており、一行が同じ把持位置と掘み換えを持つ一連の工程を表している。工程は、掘み換え回数の少ない順番に並んでおり、同じ掘み換え回数の工程の順序は重心に近い方を把持する工程を優先させているので、厳密ではないが上位の方が比較的撓みが小さいといえる。BLは把持線分に対する曲げ可能線分で、その曲げ順序は3.2.2節に基づき決定している。



(a) Final shape

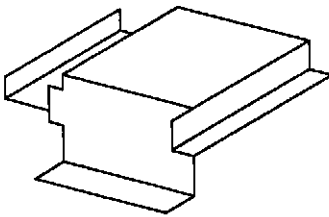


(b) Flat pattern

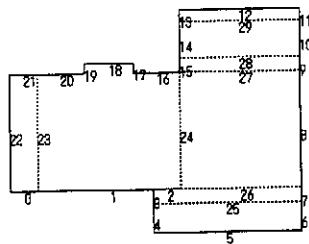
No	GP	B.L	Rpoi	B.L	Rpoi	B.L	Rpoi	B.L
h	0	20-21,23-22	22	18-19				
1	0	20,21,23-22	22	18-19				
2	9	18-19,20,21	19	23-22				
3	5	20	0	21,23-22	22	18-19		
4	5	20	9	18-19,21	19	23-22		
5	18	21	0	20,23-22	22	18-19		
6	18	21	9	18-19,20	19	23-22		
7	5	20	20	21	0	23-22	22	18-19
8	5	20	20	21	9	18-19	19	23-22
9	18	21	21	20	0	23-22	22	18-19
10	18	21	21	20	9	18-19	19	23-22

(c) Result of simulation

Fig.9 Model 1



(a) Final shape

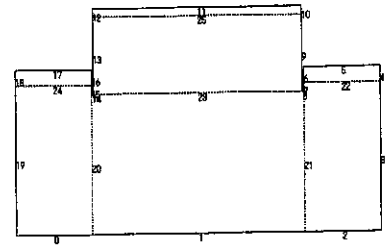
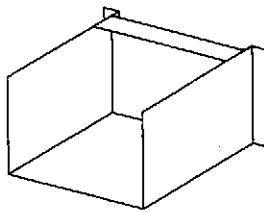


(b) Flat pattern

No	GP	B.L	Rpoi	B.L	Rpoi	B.L	Rpoi	B.L
h	1	28-27-29	16	25-26	8	23-24		
1	1	28-27-29	16	25-26	8	23-24		
2	2	28-27-29	16	25-26	8	23-24		
3	16	25-26	1	28-27-29	8	23-24		
4	5	28,28-27-29	16	25-26	8	24		
5	5	28,28-27-29	16	25-26	23	24		
6	1	28-27-29	5	23	16	25-26	8	24
7	1	28-27-29	5	23	16	25-26	23	24
8	2	28-27-29	5	23	16	25-26	8	24
9	2	28-27-29	5	23	16	25-26	23	24

(c) Result of simulation

Fig.10 Model 2

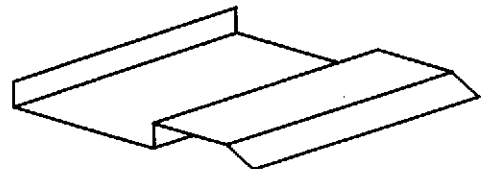


(a) Final shape (b) Flat pattern

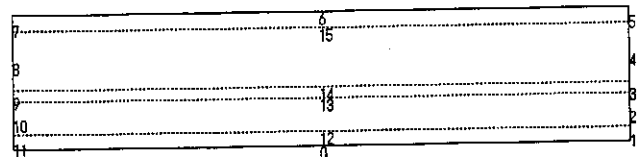
No.	GP	B.L	Rpoi	B.L	Rpoi	B.L
h	1	25-(22,24)-20	1	21-23		
1	1	22,24-20,25-23	1	21		
2	1	22-21,24,25-23	1	20		
3	11	22,24-20	1	21,25-23		
4	11	22-21,24	1	20,25-23		
5	1	22,25-23,24	3	20		1,21
27	19	25	25	24-20,22	25	21,23
28	19	25	25	22-21,24	25	20,23

(c) Result of simulation

Fig.11 Model 3



(a) Final shape



(b) Flat pattern

No.	GP	B.L	Rpoi	B.L
h	0	15	15	13-14-12
1	6	13-14-12	14	15

(c) Result of simulation

Fig.12 Model 4

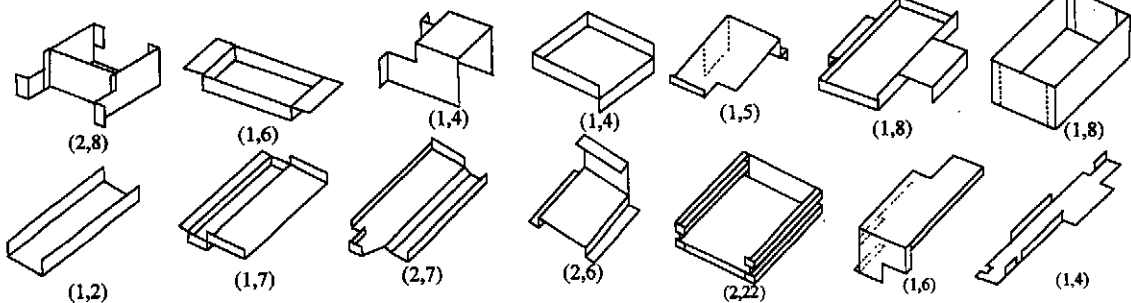


Fig.13 Verified examples categorized into 3 groups by agreement ratio

例えば図9(c)のNo.1の工程で最初の把持線分0の曲げ可能線分は、20,21,23-22となっているが、“-”で繋がれているのは23,22の順番に曲げることを意味し，“”で区切られている20,21,23-22は曲げ順序の制約はない。

5.2 個々の板金モデルに基づく考察

図9のモデル1においてNo.1の工程でははじめに0を掴み、そのときの曲げ可能線分20,21,22,23を曲げた後22に掴み換えて、その後18,19を曲げる。20,21,22は把持線分0における板金部品接続グラフにおいて深さが同じ曲げ線分であるので、これら3つの曲げ線分では、曲げ順序の制約はなく、それら3つの順列(3!=6)が曲げ順序となる。このモデルの干渉判定回数は文献[2]の手法では192回になるが、本研究手法では工程No.1の干渉判定回数は、No.1からNo.10までの干渉判定回数を合計しても20回ですむ。さらに工程は掴み換え回数と厳密ではないが把持位置に対する掴みの評価を行い、かなり妥当な優先順序で並んでいるので、No.1から干渉判定を行い、その判定を満たせば、すべての工程に対して干渉判定を行う必要はない。また、モデル1では工程設計者の工程がNo.1と一致するので、このモデルでは掴み換えと掴みによる評価は妥当である。

図10のモデル2で、シミュレーションで求めた工程と工程設計者の工程を比較すると、No.1が一致している。最初の把持線分1に対する曲げ順序28-27-29はチャンネルの手順に従って曲げる。工程設計者の工程も28-27-29となっておりチャンネルによる曲げ順序の決定方法は有効であることが分かる。

図11のモデル3で工程設計者に近い工程はNo.1である。ここで掴み換え後の把持線分が同じ場合(例えば図11(c)のNo.1,2)は、掴み換えにより把持位置をずらしたことを表す。このモデルでは、曲げ順序の制約ルールから25を曲げた後に23を曲げなければならない。しかしここで25と23の後に20または21を曲げようとする外形線分12または10と11が金型と干渉してしまう。従って、このモデルでは20,21,25の後に23を曲げなければならない。このモデルの場合、工程設計者は曲げ可能線分を決めるときに次の把持位置で起こり得る金型と材料の干渉を予め考慮している。本手法では、次の把持位置に対して起こり得る干渉までは考慮していないので、このモデルでは設計者と同じ工程は探索できない。しかし、シミュレーションで生成された工程の中には20,21,25の後に23を曲げる工程が幾つか生成されている。(No.3,4ならびに27,28)従って設計者の工程とは完全に一致しないが実行可能な工程の生成を確認した。

図12のモデル4で設計者と同じ工程を得ない理由を説明する。設計者の工程では初期把持線分0を把持して15を曲げ、次に13,14が曲げ可能であるが曲げずに15に掴み換えて残りの曲げ線分を曲げる。われわれのシミュレーションでは0を把持して実行すると、13,14,15と曲げてしまい、次に13を把持するとクリアランスが足りずに12を曲げることができなくなる。従って、初期把持線分0を除外し6

を選んだ工程を生成している。設計者と同じ工程を生成するためには15を将来の把持線分として残す必要があり、そのためにはエッジ列[4 14 8 15]で構成されている曲げ面を掴み換え把持位置のために残す必要がある。この工程を生成するためには一度求めた工程をすべて再評価し、それらをフィードバックして微妙な工程のバリエーションを作成することになる。実際には対抗する解が得られているので実施の必要性に関して現場でさらに多くのテストが必要である。

図13には本研究で適用したその他の板金部品の一部を示す。()内の数字は生成結果の分類(左側)と曲げ線分の数(右側)を示している。図13の下段左から5番目のモデルは曲げ線分の本数が一番多く22本であった。この場合も計算時間はほとんど変わらず曲げ線分が多いことによる困難はなかった。本手法によるシステムは、WindowsNT v4.0上にVisual C++v6.0で実装した。

6. 結論

本論文では、板金部品のロボット曲げ加工の自動工程生成手法を提案し、その手法を実装してシミュレーションを行い以下の結論を得た。

- (1) ロボット曲げ加工の工程生成の際に把持位置や掴み換え決定条件の重要性を示し、それに基づく工程生成手法を提案した。
- (2) この手法に基づきPC上にシステムを構築し、多数の実用モデルによる工程生成シミュレーションを行った。その結果、把持位置や掴み換えのタイミングとそのときの曲げ可能線分が明確に定まり、採択が容易で実用的な工程を得ることができた。
- (3) チャンネルを基にした曲げ順序決定方法を採用し、その他の形状特徴にも対応できた。
- (4) 本手法により板金部品の幾何的な干渉判定の回数を大幅に絞り込むことができた。

7. 謝辞

本研究に対して研究助成を賜った天田金属加工機械技術振興財団および関係者各位に深く感謝します。

文献

- (1) アマダ板金加工研究会編, 曲げ順序入門, (1988) マシニスト出版。
- (2) 安部・乾, 精密工学会誌, 63-9 (1997), 1263-1267.
- (3) 乾, 精密工学会誌, 65-2 (1999), 267-271.
- (4) C. Wang, D. A. Bourne., Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 13-3 (1997), 281 - 294.
- (5) E., Zussman., Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 11-1 (1994), 35 - 40.
- (6) C.WANG, CMU-RI-TR-97-35, September, 1997