

突き当て計測誤差最小を考慮した最適板金曲げ加工工程設計

青村 茂*

1. 緒言

板金の曲げ加工の多くは、パンチとダイを取りつけたプレスブレーキを用いて行われるが、近年ではロボットを用いて板金部品のハンドリング作業効率を向上させている(図 1)。ハンドリングロボットによる曲げ加工の工程設計では、部品の曲げ順序、使用する金型、それぞれの曲げ部を曲げるときの計測基準位置に加えて、ロボットの材料把持位置、掴み換えのタイミングを明確に決定する必要がある。

曲げ加工の工程設計自動化に関する研究では、D. A. Bourne¹⁾らが、形状特徴²⁾に基づいてヒューリスティックなルールを定義し、そのルールに従った工程生成の手法を提案した。また、乾らは板金プロダクトモデルを定義³⁾し、曲げ順序をツリーで管理して、干渉条件を満たさない曲げ順序を途中で破棄して、工程を求める手法を提案した⁴⁾⁵⁾。

その一方、曲げ加工では、曲げるときに生じる材料の伸び誤差、曲げ角度誤差、計測基準ゲージの位置決め誤差が板金部品の特定の寸法部に累積する問題があり、曲げ順序と計測基準位置の違いにより、それらが累積する寸法部は異なる。そこで Streppel⁶⁾らは、予め得られた工程に対して、寸法部の累積誤差を計算する手法を提案しているが、効率よく工程を生成するには至らない。

筆者らも、ロボットの曲げ加工を対象とした工程生成手法を提案した⁷⁾⁸⁾⁹⁾。この手法では、材料の撓みを考慮してロボットの把持位置を決定し、板金部品の途中形状と把持位置に対する曲げ線分の位相的關係を考慮して掴み換えのタイミングを決定した。その結果、多くの板金部品について工程設計者と同じ工程を得ることができたが、誤差に関しては考慮していない。しかし、実際には、特定の寸法部に誤差が累積しないように工程設計者が曲げ順序と計測基準位置ならびに掴み換えのタイミングを調整するため、一部の板金部品については設計者と同じ工程が得られないケースがあった。そこで、我々は人間の作業者を対象として、図面に誤差が厳しく指定された寸法部(以下重要寸法部とする)に着目し、この重要寸法部に誤差が累積しない曲げ順序と計測基準位置を効率よく求める手法を提案した¹⁰⁾。この手法により、重要寸法部の精度を満たす工程を得ることができたが、ロボットの把持位置と掴み換えのタイミングは決まらない。

そこで本論文では、ハンドリングロボットによる曲げ加工を対象とし、それぞれの曲げで生じる誤差の存在は認めつつも、重要寸法部に誤差が累積しないように、ロボットの材料把持位置、掴み換えのタイミング、曲げ順序、曲げ部の計測基準位置を決定する手法を提案する。はじめに、板金部品の展開図から板金部品接続グラフを生成する。次にヒューリスティックなルールを設定して、そのルールに基づきロボットの材料把持位置を決定し、把持位置をルートノードとして板金部品接続グラフから工程生成ツリーを作成する。工程生成

ツリーにおいてルートノードからそれぞれの曲げ線分の位相的關係を考え、さらに重要寸法部に誤差が累積しないルールを適用して工程を得る。この手法に基づき実際に工場で加工された板金部品に対して、工程生成シミュレーションを実施し、期待された効果が認められたので、ここに報告する。さらに、シミュレーションで生成された工程と工程設計者の工程を比較し、本手法の有効性を確認した。

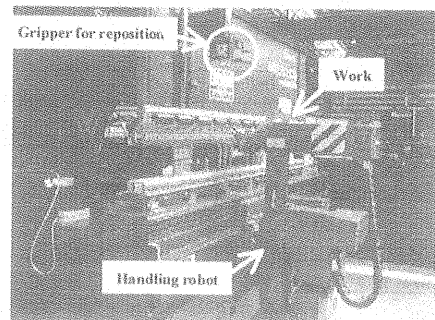


Fig.1 Press brake with handling robot

2. 曲げ加工における誤差累積の原理

この章では、曲げで生じる誤差とその累積原理について実例を用いて説明する。

2.1 曲げ誤差

曲げ加工では、一回の曲げ操作に対して以下の3つの誤差が生じる。

(1)曲げ角度の誤差： $\delta\alpha$

材料のスプリングバックにより生じる誤差

(2)材料の伸び誤差： δL

材料の塑性変形により生じる誤差

(3)位置決め誤差： δP

バックゲージによる材料のずれから生じる誤差

図2(a)の板金部品で、寸法部 d_i (すなわち c と d の間)に対して誤差が累積されない曲げ工程を図2(b)Sequence1~4に示す。図2(a)において a 点と f 点は板金部品の端点を示す。 b 、 c 、 d 、 e 点は曲げ部を表している。併せて、それぞれの状態のロボット把持位置と曲げ部の計測基準位置も示す。

2.2 曲げ誤差の累積

曲げ部の誤差の累積について、それぞれの曲げ部の指定された位置からの誤差(以下絶対誤差とする)と、異なる2つの曲げ部の間の誤差(以下相対誤差とする)の二つについて考える。Sequence1において曲げ部 e を曲げたときに生じる絶対誤差 δe は以下のようなになる。

$$\delta e = \delta P_e + \delta L_e \quad (1)$$

ここで、 δP_e は、計測ゲージにより生じる曲げ部 e の位置決め誤差、 δL_e は曲げ部 e を曲げたときに生じる材料伸びの誤差である。以下それぞれの曲げ部について絶対誤差を考える。Sequence2での曲げ部 c の絶対誤差 δc は、次のようになる。

$$\delta c = \delta P_c + \delta L_c \quad (2)$$

Sequence3 では、すでに曲げられた曲げ部 c の絶対誤差 δc も考慮すると絶対誤差 δd は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \delta d &= \delta c + \delta P_d + \delta L_d \\ &= \delta P_c + \delta L_c + \delta P_d + \delta L_d \end{aligned} \quad (3)$$

最後に Sequence4 で、絶対誤差 δb は次のように表される。

$$\delta b = \delta P_b + \delta L_b \quad (4)$$

次に、これらの(1)~(4)式を考慮して図 2(a)の寸法部 d_1 ~ d_3 までに生じる誤差を考える。寸法部 d_1 の誤差 δd_1 は、絶対誤差 δb と同じになる。

$$\delta d_1 = \delta P_b + \delta L_b \quad (5)$$

寸法部 d_2 の誤差 δd_2 の誤差は、曲げ部 b と c の相対誤差になる。曲げ部 b と c の絶対累積誤差は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \delta d_2 &= \delta b + \delta c \\ &= \delta P_b + \delta L_b + \delta P_c + \delta L_c \end{aligned} \quad (6)$$

寸法部 d_3 の誤差 δd_3 は、曲げ部 c と d の相対誤差を考えるが、 δd_2 とは異なり、すでに曲げた c を計測基準位置として d を曲げるので、 δd_3 は以下ようになる。

$$\delta d_3 = \delta P_d + \delta L_d \quad (7)$$

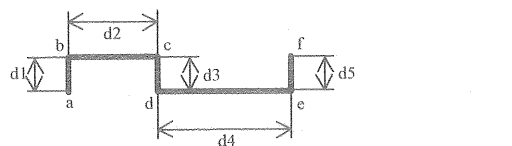
また、寸法部 d_4 の誤差 δd_4 は、 δd_2 とは対照に曲げ部 d と e のそれぞれの絶対誤差が累積して以下ようになる。

$$\begin{aligned} \delta d_4 &= \delta d + \delta e \\ &= \delta P_d + \delta L_d + \delta P_e + \delta L_e \end{aligned} \quad (8)$$

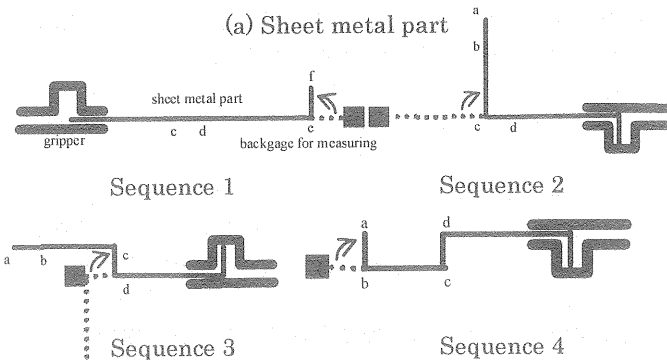
最後に寸法部 d_5 の誤差 δd_5 は、曲げ部 e の絶対誤差により以下ようになる。

$$\delta d_5 = \delta P_e + \delta L_e \quad (9)$$

(5)~(9) 式を見ると、寸法部 d_1 に誤差は累積されないが、寸法部 d_2 , d_4 には誤差が累積する。板金部品の重要寸法指定は、図 2(a)の寸法部 d_i のように曲げ部間を指定することが多いので、指定された曲げ線分間の相対誤差が小さくなるように工程を設計しなければならない。逆に、それぞれの曲げ部の絶対誤差が少し大きくても、重要寸法部に相当する曲げ部の相対誤差を小さくすることができれば工程として採用できる。そこで本論文では、重要寸法部に相当する曲げ部の相対誤差を小さくする工程の生成に注目する。



(a) Sheet metal part



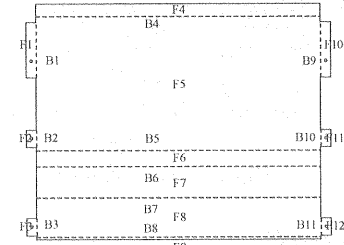
(b) Bending sequence of sheet metal part

Fig.2 Sequence of sheet metal bending

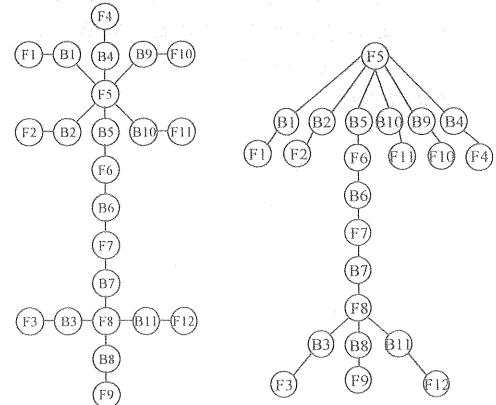
3. 工程生成で用いるモデルと加工ツール

3.1 幾何モデルと位相モデル

幾何モデルは、展開図 CAD データから生成するサーフェイスモデルである。はじめに、展開図の外郭を形成する外形線分を抽出し、外形線分を基に最小ループを抽出する。抽出された最小ループを曲げ面 F_i ($i=0,1,2,\dots,n-1$) とし、得られた曲げ面に対して異なる二つの曲げ面が共有する外形線分を曲げ線分 B_j ($j=0,1,2,\dots,m-1$) とする。ここで n は得られた曲げ面の数、 m は得られた曲げ線分の数である。



(a) Flat pattern of sheet metal part



(b) Connectivity graph and tree for sheet metal part

Fig.3 Flat pattern and connectivity graph

展開図 CAD データより得られた幾何モデルより曲げ面 F_i と曲げ線分 B_j をノード、それらの接続関係をエッジで表現した板金部品接続グラフ G を作成する。そして、ロボットが材料を把持する曲げ面が決まったときに、その面に相当する曲げ面をルートノードとした工程生成ツリー T を作成する。工程生成ツリー T は、把持位置に対する曲げ順序とそれぞれの曲げ線分の計測基準位置を効率よく決定するために用いられ、掴み換えで把持面が変わるときは、その都度更新される。図 3(a)に幾何モデルの展開状態を示し、図 3(b)板金部品接続グラフ G と図 3(a)の曲げ面 F_i を把持面としたときの工程生成ツリー T を示す。

3.2 ロボット把持位置の表現

ロボットの把持位置は幾何モデルにおける曲げ面 F_i の外形線分上の一点とし、把持位置を含む線分を把持線分 GL 、把持線分を含む曲げ面を把持面 GF とする。

3.3 ロボットグリッパの仕様

材料を把持するためのロボットグリッパの仕様は、図 4(a)のように把持したときに材料とグリッパが干渉しないための仕様 (h , d , w , l) と、図 4(b)のように材料を曲げたときにグリッパとプレスブレーキが干渉しないための仕様 (l_w , l_a) があらかじめ定められている。前者の仕様は材料の把持位置を決めるときの制約条件となる。また、後者の仕様

は把持位置に対して曲げ可能な線分を決めるときの制約条件となり(10)式で表す。

$$\begin{cases} l_{dv} \geq l_{cv} + w/2 \\ l_{dh} \geq l_{ch} + l_g \end{cases} \quad (10)$$

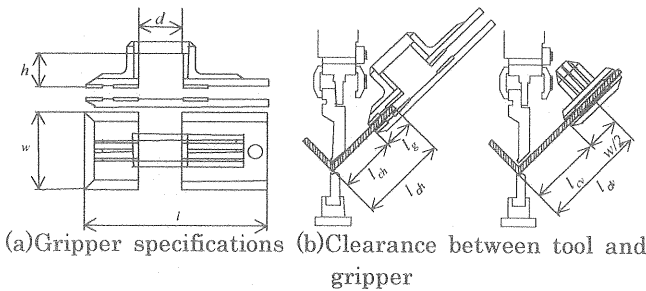


Fig.4 Robot gripper

3. 4 金型の種類

本論文では、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必要な種類や長さの金型を用いることができるものとする。

3. 5 計測基準ゲージ

曲げ線分を曲げるときに、その曲げ線分の位置を計測するために計測基準ゲージを用いる。計測基準ゲージは図5に示すように二つのゲージで構成され、それらのゲージ間の距離 d_g には、最小値 $d_{g_{min}}$ ならびに $d_{g_{max}}$ が予め定められている。本論文では、計測基準ゲージの位置を曲げ面 F_i の外形線分で M_i として表現する。

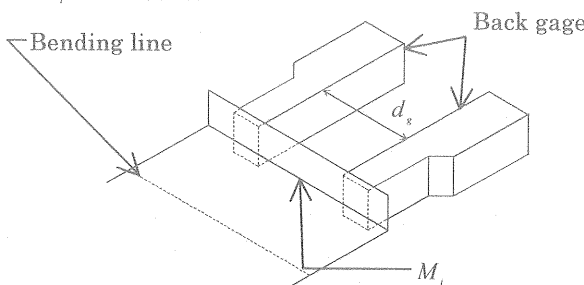


Fig.5 Gauge for measuring bending line

3. 6 曲げ面、曲げ線分の位相的距離の定義

図3に示した工程生成ツリー T に対して、ルートノードからリーフノードの向きに曲げ面 F_i ならびに曲げ線分 B_i まで辿り、その経路上で得られたノード列を得る。得られたノード列に対して位相的距離を以下のように定義する。

$$d(B_i) = [F_i, B_i, F_i \dots] \quad (11)$$

さらに、二つの異なる曲げ線分ならびに曲げ面の $d(B_i)$ と $d(F_j)$ を比較して、 $d(B_i)$ が $d(F_j)$ の部分列であるとき F_j は B_i よりも遠いとする。

3. 7 重要曲げ線分の定義

重要寸法部に関連する二つの曲げ線分に対しては、これらの曲げ線分間に誤差が累積することを避けなければならない。本論文では、この二つの曲げ線分を重要曲げ線分 CB_i と定義して、ほかの曲げ線分とは別に扱う。重要曲げ線分は必ず二つで一組として扱い、これらの重要曲げ線分は工程を自動生成する前に予め幾何モデルの中で指定する。以下、重要曲げ線分を $CB_i = \{cb_{i1}, cb_{i2}\}$ として表現する。

4. 工程生成の制約と生成ルール

本章では、工程を生成するとき生じる制約と効率よく工程を生成するためのルールを説明する。

4. 1 同一直線上にある曲げ線分の曲げ

図6に示すように複数の曲げ線分が展開状態のときに同一直線上にあるときは、以下の二つのケースについて曲げの制約を設ける。図6の左図に示す板金部品のように穴をまたいで曲げ線分が指定されているときは、すべて同時に曲げなければならない。この場合、板金部品接続グラフ G で同じ曲げ面と接続している曲げ線分はすべて同時に曲げる。また、図6の右図のようにそれぞれが異なる曲げ面と接続している曲げ線分でも同一直線上にある曲げ線分はすべて同時に曲げる。曲げるタイミングは工程生成ツリー T において位相的距離が最も遠い曲げ線分を曲げるときとする。

Collinear bending lines

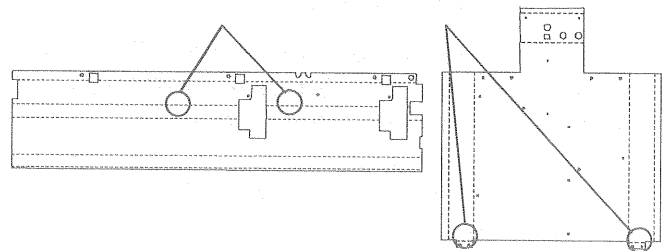


Fig.6 Sheet metal part with collinear bending line

4. 2 掴み換えのタイミングについて

ロボットが材料を掴み換えるのは以下の3つの制約を満たす曲げ線分が存在するときである。

(1) 金型とロボットグリッパが干渉するとき

ロボットの把持位置に対して(10)式を満たさない曲げ線分が存在するときは、その曲げ線分を曲げずに掴み換える。

(2) 位相的距離を考慮した制約

ロボットの取り得る姿勢の制限により工程生成ツリー T において把持面を基準としてすでに曲げた曲げ線分 B_i よりも位相的距離が遠い曲げ線分 B_j ($i \neq j$) が曲げられていないとき、 B_i は曲げずに掴み換える。

(3) 重要曲げ線分を考慮した掴み換えの制約

2つの曲げ線分 cb_{i1} と cb_{i2} で構成された重要曲げ線分 CB_i の精度を維持するために、すでに曲げられた一方の曲げ線分を計測基準位置とし、もう一方を曲げる。そこで CB_i 間の精度を維持するために2つのルールを設定する。

① cb_{i1} と cb_{i2} の位相関係を考慮したルール

図7(a)の寸法部 d を重要寸法部として、この重要寸法部の精度を満たすための掴み換えを考える。このとき、重要曲げ線分 cb_{i1} と cb_{i2} は図7(b)のように表され、そして、図7(c)と(d)の把持位置と板金部品の途中形状を考える。図7(c)のときには曲げ線分 cb_{i2} を曲げるときには cb_{i1} を計測基準位置とできるので、重要寸法 d の精度を維持できるが、図7(d)では誤差が累積する。そこで cb_{i1} と cb_{i2} の位相的距離を考える。図7(c)では、すでに曲げた曲げ線分 cb_{i1} は、まだ曲げられていない cb_{i2} より位相的距離が遠いが、図7(d)では位相的距離が逆に近い。そこで、ペアとなっている一方の曲げられた曲げ線分が、もう一方の曲げられていない曲げ線分より、位相的距離が近いときは掴み換える。

② cb_{i1} と cb_{i2} の曲げ角度の関係を考慮したルール

すでに曲げた曲げ線分を計測基準位置とするときには、その曲げ線分の曲げ角度が鈍角(すなわち 90° 以上)のときは誤差が大きくなるので、 cb_1 と cb_2 の曲げ角度で、一方が鈍角でもう一方が鋭角の曲げ角度の時には、鋭角の曲げ角度の曲げ線分を先に曲げて、次に鈍角の曲げ線分を曲げる。図7の例では、 cb_1 を曲げてから cb_2 を曲げる。ある把持位置に対して、この曲げ順序が満たされないときは掴み換える。

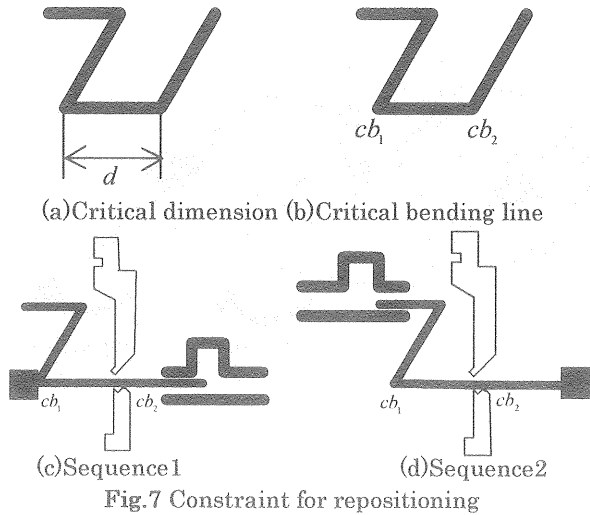


Fig.7 Constraint for repositioning

4. 3 計測基準線分の決定について

現在の把持線分 GL に対してある曲げ線分 B_i を曲げるときの計測基準線分 M_i を決めるときは、 B_i よりも位相的距離が遠い曲げ面 F の中で決定しなければならない。図8左図に加工している板金部品を、図8右図にはそのときの工程生成ツリー T を示す。このときには曲げ面 F_1 が工程生成ツリー T のルートノードとなり、曲げ線分 B_2 よりも位相的距離の遠い曲げ面 F_1, F_2 を構成する外形線分の中から決定する。曲げ線分 B_i と計測基準線分 M_i は、平行でなければならず、ゲージに突き当てるために十分な長さも必要となる。従って、計測基準線分 M_i の条件は以下ようになる。

- (1) 曲げ線分 B_i より位相的距離の遠い曲げ面 F の外形線分
 - (2) $\vec{M}_i \parallel \vec{B}_i$
 - (3) $dg_{\min} \leq |\vec{M}_i| \leq dg_{\max}$
- ここで、 \vec{M}_i は計測基準線分 M_i の方向ベクトル、 $|\vec{M}_i|$ は M_i の長さ、 \vec{B}_i は曲げ線分 B_i の方向ベクトルである。

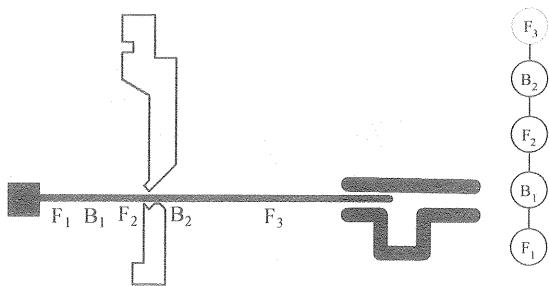


Fig.8 Constraint for determining back gage position

4. 4 把持位置と曲げ線分の関係

ある材料把持位置に対して3. 3節の制約条件を満たした曲げ線分をすべて曲げた後の途中形状では、図9に示すよう

に掴み換えを行っても、残りの曲げ線分を曲げられない場合が生じる。そのときには、すでに曲げられた曲げ線分の中で現在の把持位置に対する工程生成ツリー T を考えて、位相的距離が最も近い曲げ線分より順次に、新たな把持位置が見つかるまで展開する。

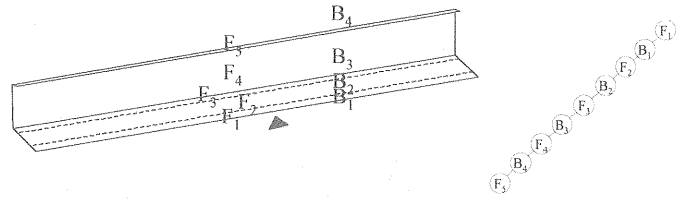


Fig.9 Grasping position and reposition

5. 工程生成の手法

図10に工程生成の概略を示し、この概略に従ってそれぞれの処理の要点を説明する。

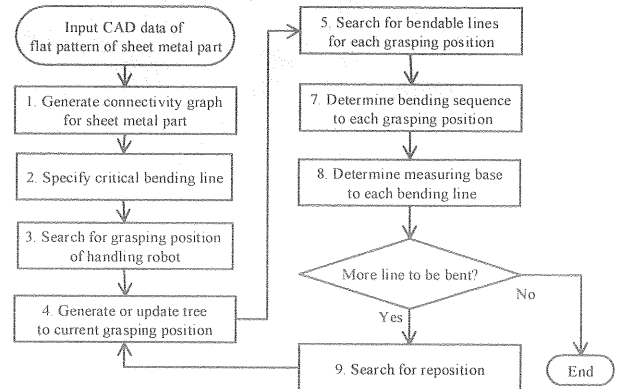


Fig.10 Flow of generating bending sequence

(1) 幾何モデルと位相モデルの生成

板金部品展開図より幾何モデルと位相モデルを生成する。

(2) 重要曲げ線分の指定

図面を参照し、重要寸法から重要曲げ線分を指定する。

(3) 把持位置の決定

板金部品の展開図を構成するすべての線分に対して展開図重心からそれぞれに法線を引き、その法線との交点を把持位置とする。これら把持位置は複数得られるが、これらの中からより重心に近いものを優先して把持位置とする⁷⁾。

(4) 工程生成ツリー T の作成/更新

把持位置に対して板金部品接続グラフ G から工程生成ツリー T を作成する。

(5) 曲げ可能線分の探索と曲げ順序の決定

3. 3節, 4. 1節, 4. 2節で説明した制約を満たす曲げ可能線分を探索し、それらの中で、工程生成ツリー T を用いて曲げ順序を決定する。この曲げ順序の決定方法については、文献(7)で詳細に説明している。

(6) 計測基準線分の決定

現在の把持位置に対して4. 3節を満たす計測基準線分を求め、それらの計測基準線分に対して実際の設計現場でもちいられているコスト評価により決定する

6. 工程生成シミュレーションと考察

提案して手法により PC 上にシステムを構築し、工程生成シミュレーションを行った。本章では、シミュレーションに

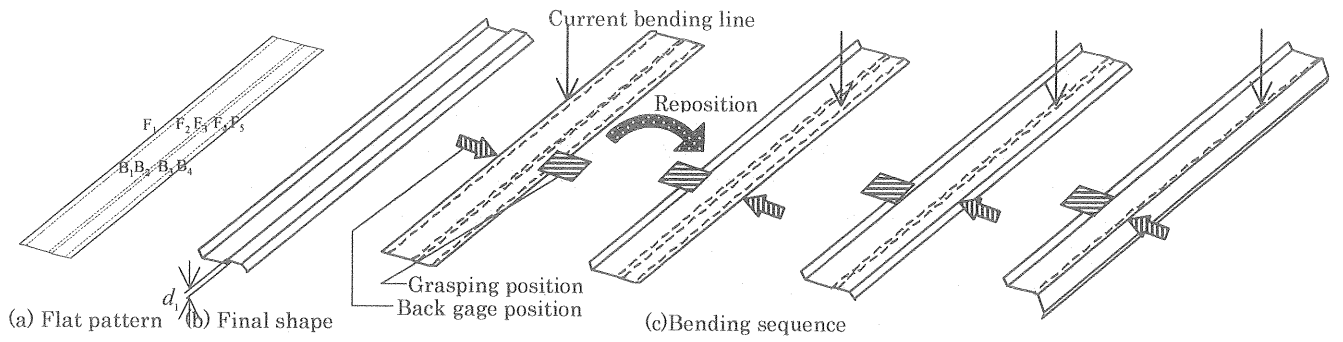


Fig.11 Result of simulation

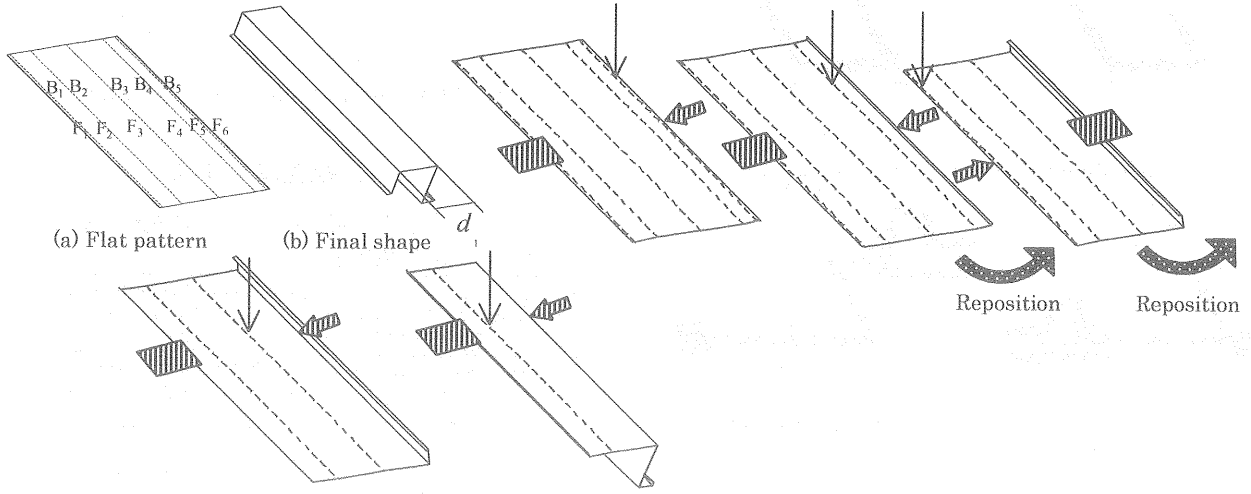


Fig.12 Result of simulation

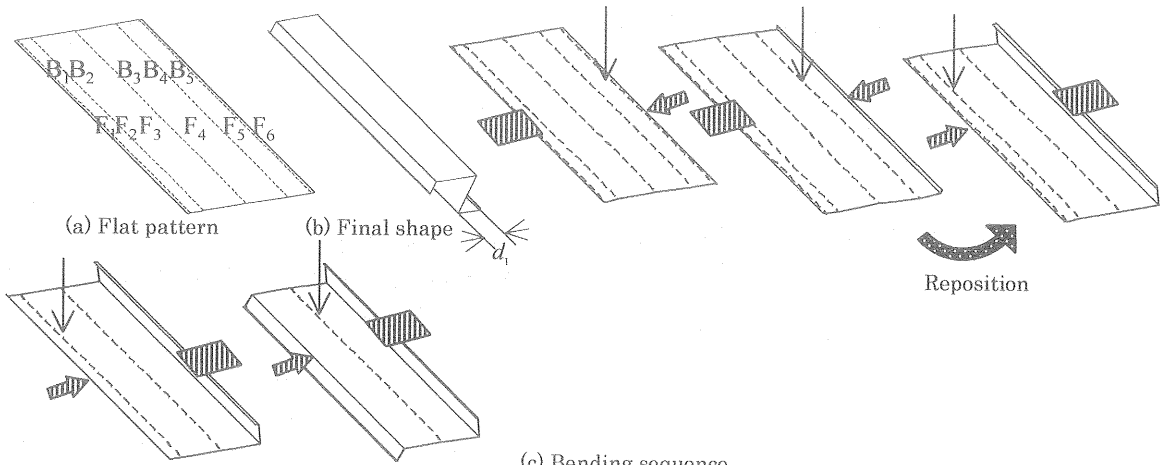


Fig.13 Result of simulation

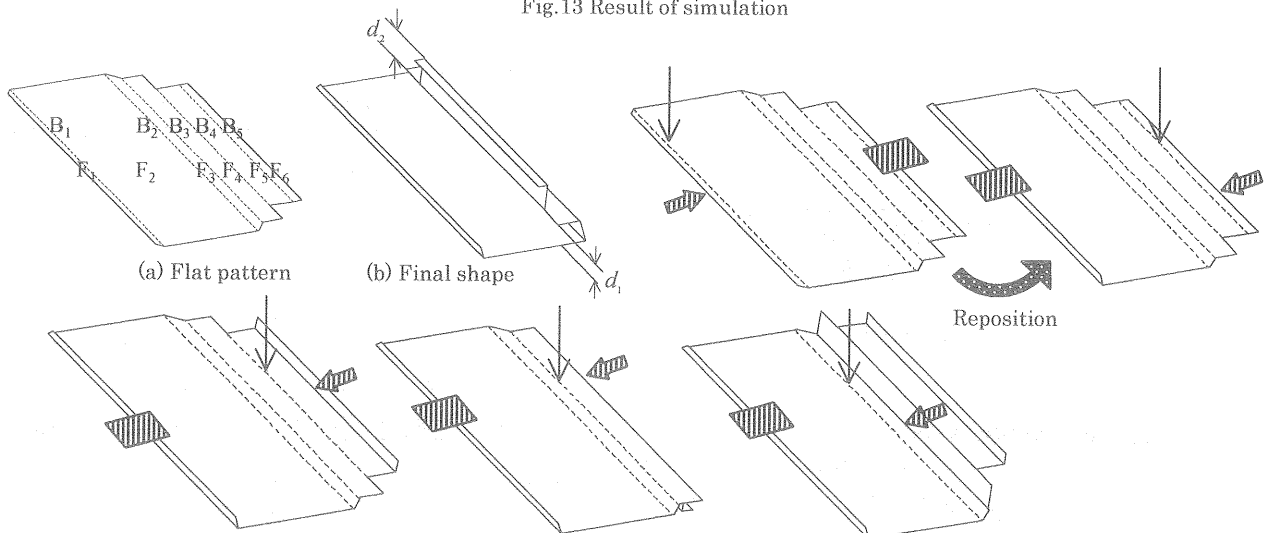


Fig. 14 Result of simulation

用いた板金部品モデルとその結果について議論する。

6. 1 板金モデル

ある企業で用いられている板金部品モデル 106 題を入手して、それらをシミュレーションの対象とした。それらのうち内部にタブを有するモデルは、その曲げ線分に対して重要寸法指定が存在しなかったため対象外とした。その結果、シミュレーション可能なモデルは 101 題であったので、実用的な適用性を大きく失うものではないと考えられる。また、101 題すべての板金部品に対しては、工程設計者による現実的な工程が与えられており、シミュレーションの検証としては最適であった。シミュレーション結果として、(1)重要寸法指定が 1 つの板金部品、(2)形状は同じであるが重要寸法部の指定箇所が異なる板金部品、(3)重要寸法部が複数指定されている板金部品について示し、本手法の有効を示す。

6. 2 シミュレーションに関する考察

(1)例題 1 (重要寸法指定が 1 箇所のモデル)

この例題では、重要寸法の指定は 1 箇所、図 11(b)の寸法部 d_1 である。それぞれの曲げ角度は $B_1=90^\circ$ 、 $B_2=B_3=110^\circ$ 、 $B_4=80^\circ$ である。それぞれの曲げ途中形状について矩形で示しているのはロボットの把持位置であり、さらに \downarrow で示しているのは、そのとき曲げる曲げ線分を示している。重要寸法部 d_1 から B_2 と B_3 重要曲げ線分のペアとなる。はじめに、把持面として F_1 を把持して曲げ可能線分 B_1 、 B_2 が得られるが、 B_1 、 B_2 と曲げると新たな掴み換え位置がなくなるので、4.3 節の制約に基づき B_1 のみを曲げる。重要寸法 d_1 の精度を維持するために、すでに曲げた B_2 を計測基準位置として B_3 を曲げる。このモデルのシミュレーション結果は、工程設計者の工程と一致しており、本論文で、重要寸法部の精度を満たすためのルールが有効に適用されているモデルである。

(2)例題 2 (形状が同じでも重要寸法指定部の異なる部品)

図 12 と図 13 に示される二つのモデルでは、形状が互いに類似しているが指示する重要寸法の指定位置が異なるため、結果として工程が異なるケースである。このモデルでは、本論文で設定したロボット掴み換えのルールが有効に働いている。図 12 のモデルでは掴み換えが 2 回生じているのに対して、図 13 のモデルでは掴み換えは 1 回ですむ、この原因としては図 12 のモデルでは、重要曲げ線分のペアが B_2 、 B_3 になるが、それぞれの曲げ角度が $B_2=115^\circ$ 、 $B_3=75^\circ$ であるので、 B_2 は鈍角になる。従ってすでに述べた掴み換えの制約条件に従い、 B_1 を曲げてから B_2 を曲げる曲げ順序を生成するために 3 番目から 4 番目の曲げに移るときに掴み換えを行う。この掴み換えにより、すでに曲げた B_1 を計測基準位置として B_2 を曲げることができ、その結果、重要寸法 d_1 の精度を維持することができる。図 13 のモデルでは、はじめに F_1 を把持する段階で、重要曲げ線分に指定されている B_1 、 B_2 を曲げることができ、さらに、 B_3 を計測基準位置として B_4 を曲げることができ、結果として、重要寸法部の精度を維持することができる。すでに曲げたこの 2 つのモデルは、いずれも工程設計者の工程と一致する。

(3)例題 3 (重要曲げ線分が複数指定されている板金部品)

この例題では、重要寸法部の指定が 2 箇所の板金部品のモデルを取り上げる。図 14 のモデルでは重要寸法指定は 2 箇所であるが、それらは互いに平行である。重要寸法部 d_1 で

は、すでに曲げた B_3 を計測基準位置として曲げ線分 B_4 を曲げており、また、重要寸法 d_2 においても、すでに曲げた B_2 を計測基準位置として B_1 を曲げており、精度を維持することができる。

6. 3 まとめ

従来の曲げ工程設計に関する研究では、曲げ線分が n 本の板金部品に対して、理論的には $n!$ 通り存在する曲げ順序の中で、材料自身、または、金型と材料が干渉しない曲げ順序を効率よく求めることに主眼が置かれていた。しかしながら、現実には、ロボット曲げ加工の制約条件を考慮して、工程設計者の判断により材料に撓みを生じたり、精度に影響を及ぼすような把持位置と掴み換えのタイミング、曲げ順序、計測基準位置が採用されることはない。従って、工程設計では、 $n!$ 通りの曲げ順序を考えるのではなく、ある条件を満たした工程を優先的に抽出する方法でなければ現実的とは言えず、工程設計支援にはならない。その意味で、維持すべき精度の焦点を当てることは、生成された工程が計測基準位置を含めて許容誤差を満たすばかりでなく、実行可能な工程をさらに絞り込むことになり、実際の工程生成の大きな支援になる。

7. 結 論

本論文では、ハンドリングロボットを用いる板金の曲げ加工の曲げ工程を自動生成する手法を提案し、その手法を PC 上に実装してシミュレーションを行い、以下の結論を得た。(1)図面の仕様に基づき重要曲げ線分を指定して、その重要曲げ線分を曲げるときの掴み換えのタイミングを決定するルールを新たに取り入れた。(2)この手法に基づき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。(3)シミュレーションの結果、図面の仕様を満たした実用的な工程を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) C. Wang, D. A. Bourne: Design and Manufacturing of Sheet-Metal Part: Using Feature to Aid Process Planning and Resolve Manufacturability Problems Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 13, 3 (1997) 281.
- 2) アマダ板金加工研究会編:曲げ順序入門, マシニスト出版 (1988)
- 3) 乾ほか 4 名:板金製品の曲げ作業自動工程設計システムの開発, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2182
- 4) 安部・乾: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.
- 5) 乾:プレス順送加工のための高速な曲げて順生成アルゴリズム, 精密工学会誌, 65, 2 (1999) 267
- 6) L. J. de Vin, A. H. Streppel and H. J. J. Kals: Tolerancing and Sheet Metal Bending in Small Batch Part Manufacturing, Annals of the CIRP, 43, 1, (1994) 421.
- 7) 古口・青村・井越:板金のロボット曲げ加工の工程生成自動化に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 66, 646 (2000) 2060.
- 8) 古口・青村:板金のロボット曲げ加工の工程設計自動化 - 精度を考慮した曲げ順序生成, 日本機械学会設計生産システム部門講演会, (1999), 545.
- 9) S. Aomura, A. Koguchi: Optimized Bending Sequences of Sheet Metal Bending by Robot, Proceedings of FAIM, Vol.2, (2000) 1169.
- 10) 古口・青村:図面の許容誤差指定を考慮した板金の曲げ順序生成, 精密工学会講演会秋季大会講演論文集, (2000), 410.