

# 双腕ロボットによる板金曲げ加工工程設計シミュレータの開発

首都大学東京 システムデザイン研究科 ヒューマンメカトロニクスシステム学域

教授 青村 茂

(平成 23 年度 一般研究開発助成 AF-2011023)

キーワード：双腕ロボット，プレスブレーキ，吊るし把持

## 1. 背景

塑性加工を中心とする板金曲げ加工の現場ではコスト、労働条件、精度などの理由でロボット化による作業の自動化が強く望まれているが、現状、単腕ロボットによる単純な作業以外はロボット化が進んでいない。

双腕ロボットは作業の質の高度化や高効率化のために近い将来、必ずロボット作業の中心に位置付けられる技術であるが、作業の分析による左右マニピュレータの使い分けや協調動作、あるいは作業の合間に発生する持ち替え動作等の基礎的な課題が解決されておらず実用化に至っていない。

現状のマニピュレータは板金のプレスブレーキへの挿入、曲げへの追従、取り出しだけに終始しており、ロボット導入の投資に対して作業の効率が低い。さらに曲げ加工前後の材料の搬入や搬出等、双腕ロボットによる作業の多様化が望まれる。

直接の作業にかかわる明示された動作と、持ち替えのような自由度の高い動作を分け作業設計を行う必要がある。そこで本研究では把持位置決定計画と持ち替え計画からなる双腕ロボットの加工工程設計手法を提案する。

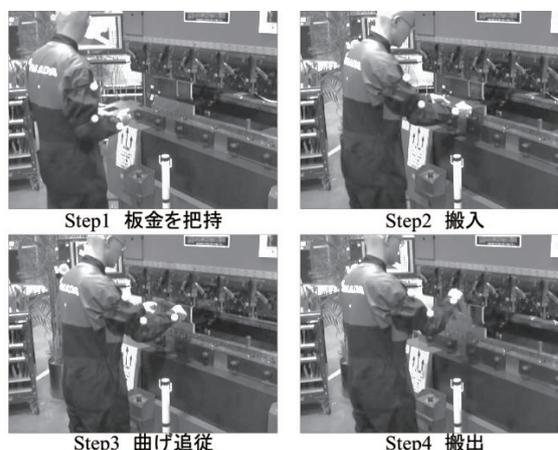


図 1 人間による両手を使った加工の様子

## 2. 目的

板金曲げ加工はプレスブレーキへの板金の挿入、曲げへの追従、取り出し等の明確に規定されている動作(図 1 および図 2 参照)とその合間に発生する動きが自由な持ち替え動作、板金の形状や大きさによる片手把持や両手把持の選択等多様な動作の組み合わせであるが、双腕ロボットがその能力を最大限に生かせる対象である。本来人間の作業は双腕であり、その動作は洗練されており完成されている。単腕ロボットの作業ではそれを参考にできないが、双腕では大いに参考にすることができる。またサイズや形状も人間に似ており、現状の作業現場に比較的自然的に配置できること等の利点がある。双腕ロボットの利点を生かす場合、作業の分析と左右の腕の役割を分析した上で協調動作を設計する必要がある。その際、

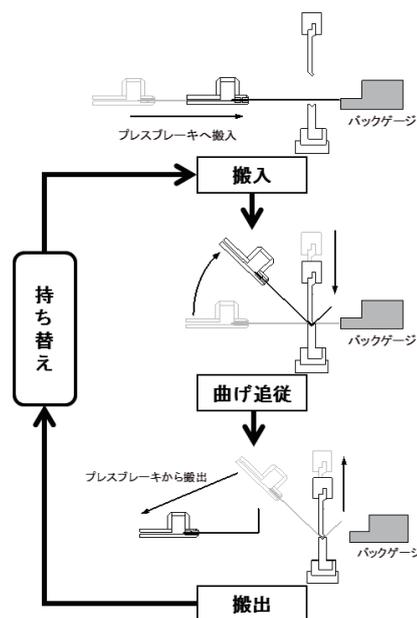


図 2 ロボットアームによる加工の様子

### 3. 把持位置決定計画手法

板金の把持位置は、「干渉しない」、「板金のたわみが設定した閾値以内」、「ロボットが姿勢をとれる」の条件を満たす位置に決定する。図3に把持位置計画手順を示す。本研究ではたわみ判定の結果に応じ、各曲げで片手把持、両手把持を使い分けることで対象に適した把持方法を選択する。また、各判定条件を満たす把持位置候補を作成し、この各曲げの候補群の中から把持位置変更が最少となる最適把持位置の選択を行う。以下で各判定項目および把持位置変更の最少化について述べる。

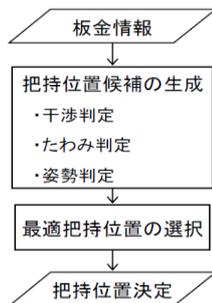


図3 把持位置計画手順

#### 3.1 干渉判定

ここで述べる干渉は2種類あり、1つは板金とグリッパの干渉、もう1つはグリッパとプレスブレーキの干渉である(図4参照)。前述したように板金曲げ加工とは複数回の曲げを経て製品形状に仕上げるため、工程の進捗に伴いフランジが立つ。このフランジを跨げる様にグリッパには高さが設けられている。しかし、このグリッパの高さが高すぎると曲げ加工中にプレスブレーキと干渉してしまう。したがって、各曲げ工程でグリッパとプレスブレーキ若しくはフランジが干渉する干渉領域を除外した把持可能領域よりグリッパの形状を基に把持位置を求める。

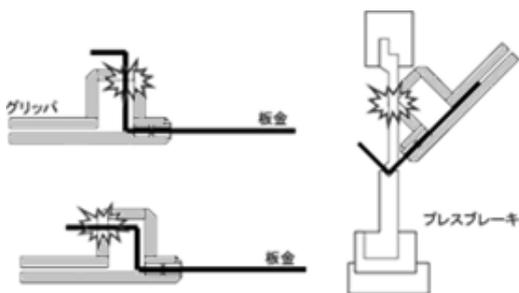


図4 2種類の干渉イメージ図

#### 3.2 たわみ判定

板金を片手で把持した際に板金のたわみ量が設定した閾値以上であれば、両手把持とし、閾値以下ならば片手把持とする。

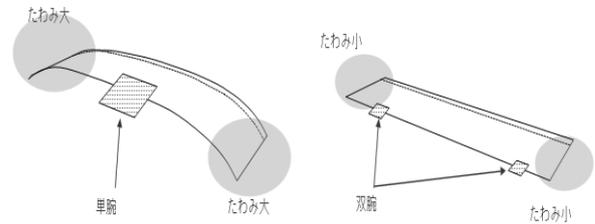


図5 たわみを低減させる両手把持

#### 3.3 姿勢判定

干渉、たわみ判定をして得られた把持可能領域から、各曲げにおける把持位置候補群を求め、ロボットが実際に姿勢をとれるか確認する。

#### 3.4 把持位置変更の最小化

前後の曲げ工程で同じ把持位置にできる場合にはそれを優先する。これを全曲げ工程に適用するため、把持位置候補をノードとしたグラフを構築し、最短経路問題を解く。グラフのノードは、各判定条件を満たすことを確認した把持位置候補と対応し、各曲げにおける把持位置および把持するマニピュレータの情報を持つ。曲げが連続するノード間をエッジで結び、全曲げ工程で把持位置変更が最少となるようにエッジにコスト設定をした。最短経路算出にはダイクストラ法を利用した。

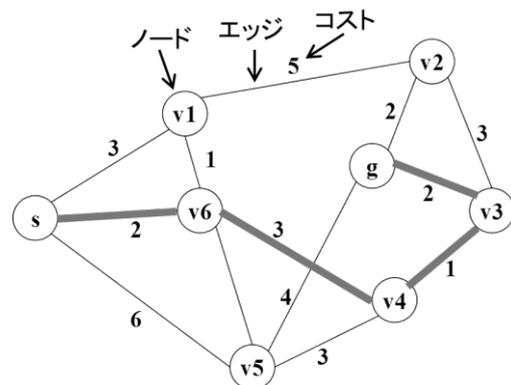


図6 最短経路問題簡略図 (太線: 最短経路)

#### 4. 持ち替え計画手法

$N$ 本の曲げ線を有する板金に対し、連続する $(n-1)$ 曲げ $n$ 曲げ( $n=2, 3, \dots, N$ )動作間毎に、(i)ノード作成、(ii)グラフ構築及び探索、(iii)ノード間の動作補間、の3段階に分割し、計画する。入力データは形状及び曲げ属性を含む板金データ、持ち替え動作のスタート・ゴールの情報となる $(n-1)$ 曲げ及び $n$ 曲げ動作でのそれぞれの把持位置、把持しているハンドの把持姿勢とする。出力データは、持ち替え動作中に両ハンドが経由する把持位置及び持ち替え動作中の各マニピュレータの動作とする。はじめに、持ち替え動作中に板金の取り得る姿勢、またそれに対してロボットの取り得る把持姿勢を入力データより定義し、後述するように計56パターン(=板金姿勢8パターン×把持7パターン)のノードを作成する。続いて、作成したノード間にエッジ設定を行い、構築したグラフからダイクストラ法を用いて最短経路を求める。グラフ探索を効率的に行うため、エッジ設定に関して事前検証を行った。最後に最短経路を構成する各ノード間のマニピュレータ動作を補間し、最終的な持ち替え動作を得る。

##### 4.1 ノード作成

$(n-1)$ 曲げ $n$ 曲げ動作間で板金の取り得る姿勢、すなわちロボットに対する板金の相対的な姿勢パターンを定義する。図7に示す座標系を有する板金に対し、 $z-x'-z''$ 系のオイラー角から表1に示す8パターンの姿勢を定義し、プレスブレーキ及びロボットとの干渉が生じない適切な位置に配置する。

定義した各板金姿勢に対し、図8に示す様に3点ずつ把持候補点(右側：右ハンド把持領域、左側：左ハンド把持領域、ロボット側：右ハンドもしくは左ハンド把持領域)を設ける。把持候補点は(i)ハンドと板金が干渉しない、(ii)板金の重心に極力近い点、という2つの条件から求める。なお、たわみが一定上になる板金では持ち替え時に板金の変形が小さくなるように把持しなければならない。そこで板金をロボットと平行になるように吊るしながら持ち替えを行う。そのため本研究では、そのような板金の持ち替えを行う際には可能な限り吊るす時に上になるロボット側に右手若しくは左手の把

持位置が存在するようにする。

続いて、定義した板金姿勢及び求めた把持候補点に対し、把持パターンを表2に示すように7パターン定義した。以上のように定義した56パターン(=板金姿勢8パターン×把持7パターン)をグラフのノードとする。また、入力データに基づき、 $(n-1)$ 曲げ及び $n$ 曲げ動作の板金姿勢パターン、把持パターンを求め、それらをそれぞれスタートノード、ゴールノードとして設定する。

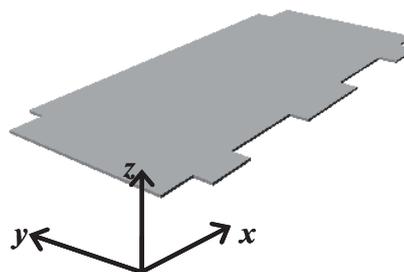


図7 座標系を有する板金

表1 板金の8パターンの姿勢

		The angle rotated on an axis (deg)		
		$z$ axis	$x'$ axis	$z''$ axis
Euler pattern	1	270	0	0
	2	0	0	0
	3	90	0	0
	4	180	0	0
	5	270	180	0
	6	180	180	0
	7	90	180	0
	8	0	180	0

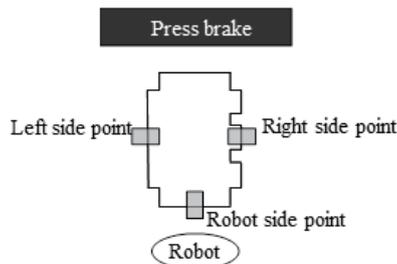


図8 3点の把持候補点

表 2 7つの把持パターン

		Where the hand grasp	
		Right hand	Left hand
Grasp pattern	1	Right side point	Left side point
	2	Right side point	Robot side point
	3	Robot side point	Left side point
	4	Right side point	-
	5	-	Left side point
	6	Robot side point	-
	7	-	Robot side point

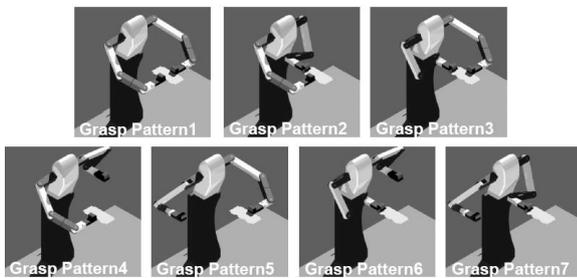


図 9 7つの把持パターンのイメージ図

しない。すなわち、板金はロボットに対して並行になり、板金姿勢パターン、把持パターンが変化する。姿勢は図 13 の右図に示す。(両手把持が不要な板金ではコストを設けない)。

グラフ探索を効率的に実施するため、設定するエッジの事前検証を行った。グラフから得られるスタート・ゴール間の複数の経路に対し、コストに基づきダイクストラ法を用いて最短経路を求める(図 11 参照)。最短経路上の各ノードの逆運動学解を求め、全ノードの逆運動学解が得られない場合には逆運動学解が存在しないノードに繋がるエッジを切断し、再度最短経路を求める。

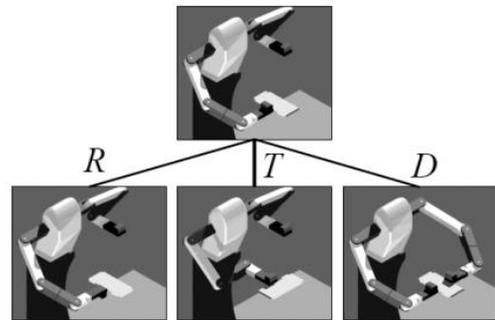


図 10 エッジ設定

## 4.2 グラフ構築及び探索

作成したノード間に双方向エッジを設定しグラフを構築する。板金の動作を考慮し、エッジに対して 4 種類のコスト(D, T, R, H)を設定し、大きさは  $D < T < R (< H)$  とした(図 10 参照)。

D: 板金位置姿勢は不変で、片手把持から両手把持(もしくはその逆)に遷移。すなわち、板金姿勢パターンが変わらず、把持パターンのみが変化する。

T: 片手把持の状態、板金の姿勢が z 軸回りに  $90^\circ$  (もしくは  $-90^\circ$ ) 回転し、それに伴いマニピュレータも移動。すなわち、板金姿勢パターン、把持パターン共に変化する。

R: 片手把持の状態、板金の姿勢が x 軸もしくは y 軸回りに  $180^\circ$  (もしくは  $-180^\circ$ ) 回転し、それに伴いマニピュレータ手首関節を回転。すなわち板金姿勢パターンのみ変化し、把持パターンは変わらない。

H: 両手把持が必要な板金形状でロボット側に腕が存在

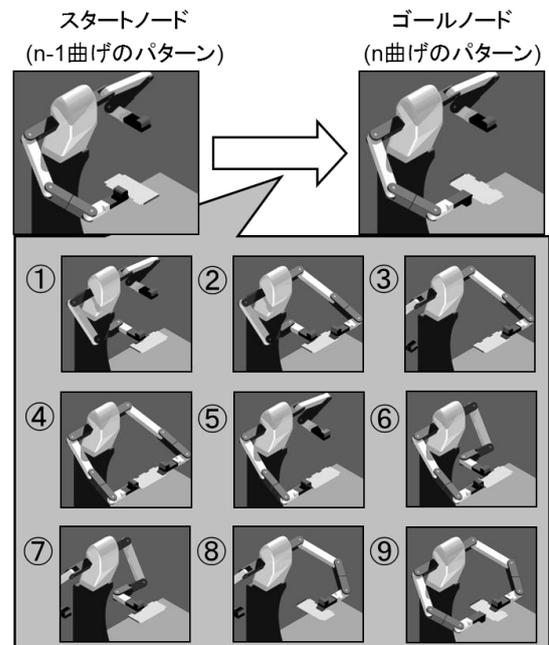


図 11 (n-1) 曲げ - n 曲げ動作間の最短経路の例 (板金を z 軸回りに  $180^\circ$  回転)

### 4.3 ノード間の動作補間

求めた最短経路上の各ノード間のマニピュレータ動作を補間する. 各ノード間における板金の変位を分割し各逆運動学解を求め, 最終的に連続する動作を作成する (図 12 参照).

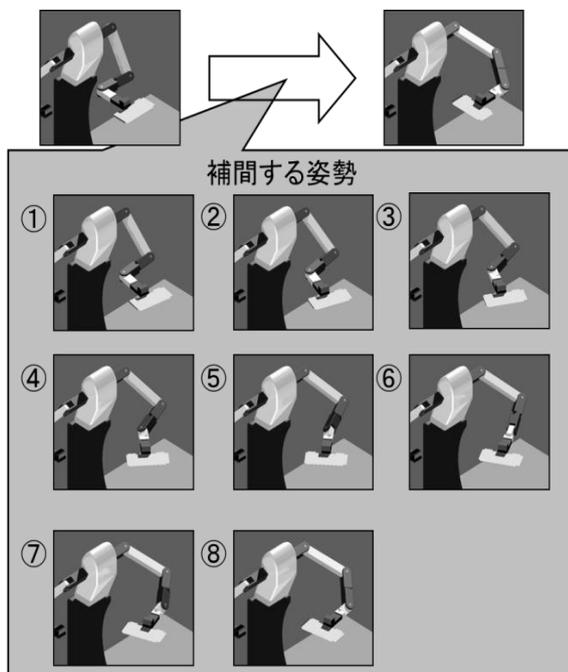


図 12 ノード間の動作補間の例 (図 9 の⑦⑧間の補正)

### 4.1 吊るし把持

本手法では, 加工時に連続して両手把持を行う必要が生じた場合, 通常の持ち替え動作ではたわみが大きくなることにより持ち替えが不可となることが想定された. そこで, その間の持ち替え動作は吊るし把持を行うように設定した. 吊るし把持とは, 板金を地面に対し垂直に把持する方法であり, この把持方法では板金に対する垂直方向のたわみを抑制することができるため, 両手把持の強みが生かせる大きなたわみが生じる大型の形状の板金の持ち替え動作が可能となる (図 13 参照).

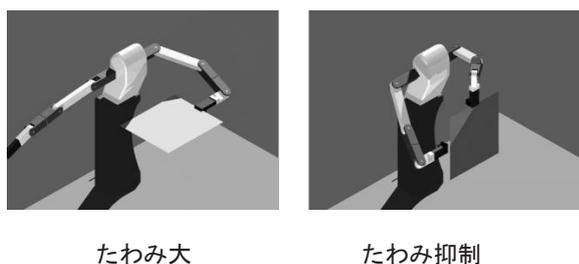


図 13 片持ち把持吊るし把持

### 5. 検証シミュレーション

以上の手法を検証するためシミュレータを作成し, 例題として実際に加工に用いられている板金に対して提案手法をシミュレーションする. シミュレータは提案手法を行う際のロボットの姿勢を計算する自作のソフトウェアと, 実際にどのような動作をロボットがとるかを検証する市販の 3DCAD ソフトウェアに分ける. これらのシミュレータでは板金とプレスブレーキ, 板金と双腕ロボットの干渉を考慮し, 実際の加工に近い環境を用意する. 検証シミュレーションを実施した一例として, 800 mm×600 mm×1 mmの大型板金を用意し, この板金を図 12 に示す手順で加工する. 曲げ線の位置は 600 mmを三分割する位置とする. ここで示す例題は②から③に移行する際の持ち替えで「吊るし把持を含めた持ち替え動作」を検証する例題である. その検証結果を図 15 に示す.



図 14 大型板金の加工順序

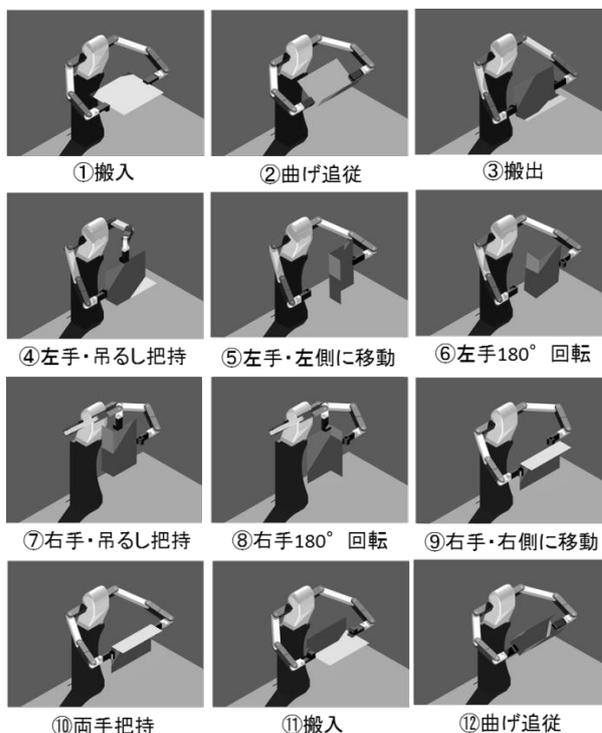


図 15 大型板金加工手順

図 13 の③から⑩において、連続して両手把持を行う必要が生じ、吊るし把持を用いない持ち替え動作では、たわみが大きくなることで持ち替えが不可となると想定されたため、その間の持ち替え動作において、吊るし把持を行い、たわみを抑制する持ち替え動作を得ることが出来た。

## 6. 結言

双腕ロボットによる板金曲げ加工における持ち替え動作の自動計画手法を提案し、片持ち把持では大きなたわみが発生すると想定される大型板金に対する検証シミュレーションを行った。そして大きなたわみを抑制するために、板金を地面に対し垂直に把持する手法“吊るし把持”を行うことで、たわみを抑制し、適切に計画が行われることを確認した。

## 7. 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成により行われました。また研究の実施に当たっては株式会社アマダ殿のご協力を得て進めてきたものであり、ここに改めて謝意を表します。

## 8. 参考文献

- 1) S.Aomura, T.Kawabe: A study on co-operative motion planning of a dual manipulator system for measuring radioactivity, *Industrial Robot*, 35, 6 (2008)541.
- 2) R. Alami, T. Simeon, J.Laumond: Two manipulation planning algorithm, *Algorithm Foundations of Robotics*, (1995) 109.
- 3) R.Alami, T. Simeon, J.Laumond: A geometrical Approach to planning Manipulation Tasks. The case of discrete placements, *International Symposium on Robotics Research*, (1991) 453.
- 4) Y. Koga, J. Latombe: On multi-arm manipulation planning, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, (1994) 945.
- 5) 渡辺哲陽, 原田研介, 江鐘偉, 吉川恒夫: 能動受動混合拘束下での物体操作, *日本ロボット学会誌*, 25, 4 (2007) 643.
- 6) 小俣透, 永田和之, 岩槻重伸, 柿倉正義: 持ち替えによる多指ハンドの物体回転操作の計画, *日本ロボット学会誌*, 12, 5 (1994) 75.
- 7) 長谷川泰久, 松野順也, 福田敏男: 寸法の異なる把持物体に対する適応持ち替え戦略, *日本機械学会論文集(C編)*, 67, 662 (2001) 3212.
- 8) 寺田英嗣, 輻形和幸: 風呂敷包み作業用マルチロボットシステムの運動計画法, *精密工学会誌*, 76, 5 (2010) 546.
- 9) T. Watanabe, M. Beetz: Grasp Motion planning for box opening task by multi-fingered hands and arms, *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, (2009) 1.
- 10) 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)
- 11) T. Koshiha, S. Aomura: Process Planning for Sheet Metal Bending by a Dual Manipulator Robot, 2009 JSPE Spring Meeting, (2009) 543.
- 12) A. Koguchi, S. Aomura: Automated Process Planning for Sheet Metal Bending by Handling Robot, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 66, 646 C (2000) 2060.
- 13) A. Koguchi, S. Aomura: Automated Process Planning for Sheet Metal Bending by Handling Robot - Process Planning Method by Taking Critical Dimension into Account -, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, 68, 4 (2002) 602.
- 14) Sedgewick. R, J.S.Vitter: Shortest paths in euclidean graphs, *Algorithmica*, 1, 1 (1986) 31.