研究論文

パラレルメカニズムを用いた曲げ加工機による管材の三次元加工*

五 嶋 裕 之**, 田 中 豊***, 一 柳 健****

Three-Dimensional Tube Forming Processes with
a New Hydraulic Bending Machine Using Parallel Kinematics

Hiroyuki GOTO, Yutaka TANAKA, Ken ICHIRYU

This research presents three-dimensional (3D) tube forming processes using a new hydraulic bending machine. The proposed bending machine uses a new method. When tube is fed into the fixed and active dies, it is bent by shifting the relative position of the active die. The bending shapes are controlled by the relative distance and orientation between the mobile die and the fixed die, and the length of the fed tube. The active die movement is controlled by six-degrees-of-freedom parallel kinematics with a hydraulic servo drive. This forming process has a big advantage. The change of the expected bending shape will require no change in the tooling system, but only a new control program for the motion of the active die and the length of the fed tube. Practical applications show that the bending machine can be applied to universal designed products with a 3D profile. Based on these bending processes, we also proposed a procedure to determine the controlling parameters of 3D tube forming processes. Experimental results show that the controlling parameters can be applied to square pipes with a helix shape. Until now this spiral process has been difficult to achieve using a conventional bending machine.

Key words : Parallel kinematics, Hexapod, Hydraulic servo, Tube bending, Three-dimensional forming process

1. 緒 言

管材として一般的な金属管は、約2000年前に古代ローマ水道に鉛管が用いられて以来、各種流体の輸送用配管として広く利用されている。20世紀に入り、金属管は自転車のフレームに代表される機械・構造物の要素としても用いられるようになった。現在金属管材は、曲げなどの二次加工がなされ、配管部品や機械構造部品として産業界で広く利用されている¹⁾。管材は、重量に対して曲げ剛性やねじり剛性が高いため、軽量化や省資源、コスト低減に有利であると考えられている。

金属管材の単純な形状の曲げ加工については、これまでに多くの加工法、加工機が実用化されている。代表的なものに、回転引き曲げ、プレス曲げなどがある²⁾。これらの加工は、素材を塑性変形させて金型の形状を金属部分に転写する方法であり、大量生産には優れている。しかし、管

材の断面形状や曲げ半径に合わせて多数の型を製作しなければならないため、多品種少量生産では高コストとなる。さらに曲げ半径が連続的に変化するような曲げや、ねじりを含む複雑な三次元形状の曲げを行うことは原理的に困難である。この問題を解決するため、村田らは引抜き型によって管を拘束しながら曲げ加工を行うMOS曲げ加工法³⁾を提案した。本加工法は押抜き型の位置を連続的にCNC制御することで、曲げ半径が連続的に変化する三次元曲げが可能であるという特徴を有するが、非円形断面の管材については三次元曲げが困難であるという制約がある。

また近年、任意の断面形状設計が可能なアルミ押出し型材が、軽量構造部材として注目されている。押出し材では、円管や角管などの単純な形状の他に、開断面や非対称形状など、複雑な断面形状が実現可能である。このような素材では、従来の曲げ加工法は適用が困難である。MOS曲げ⁴⁾や可動金型（押抜き型）の位置と姿勢を制御する押通し曲げ^{5),6)}による加工が試みられているが、複雑な三次元曲げに対する形状制御が難しく十分な加工精度が得られていない。本研究ではこのことに着目し、押通し曲げ加工における可動金型の駆動に、電動アクチュエータに比べコンパクトに大出力が得られる油圧駆動パラレルメカニズムを用いることで、従来の押通し曲げ加工機に比べシンプルな構造で任意の三次元形状に加工が行えるという特徴を持つ、管材の曲げ加工システムおよび三次元形状制御の一手法を提案

*平成21年9月9日 原稿受付

**機械振興協会技術研究所

(所在地：東京都東久留米市八幡町1-1-12)

(E-mail: goto@trijspmior.jp)

***法政大学デザイン工学部

(所在地：東京都千代田区富士見2-17-1)

****菊池製作所のづくりメカトロ研究所

(所在地：東京都八王子市美山町2161-12)

するものである。

本論文では、まず、加工原理、加工機の概略を示すとともに、試作した加工機を用いて実際に金属管材の三次元加工を行った結果を示す。曲げ加工における加工誤差の大きな影響要因は、荷重を加えて曲げ変形した後に、材料形状がわずかに戻る、いわゆるスプリングバックにある。ここでは、ねじれの加わった三次元曲げとして典型的な、螺旋形状を取り上げ、形状制御およびスプリングバックの補正手法を示す。

2. 曲げ加工機概要

押通し曲げ加工は、断面形状に合わせた、固定、可動一組の金型に材料を押通すことで加工を行うものであり、可動金型の位置と姿勢、押通す管材の押し出し量を制御することによって、任意の三次元形状の曲げ加工を実現することができる。本研究では、可動金型駆動部に従来のシリアルメカニズム（スライド、回転テーブル）による一般的な多軸制御ではなく、Stewart-Goughプラットフォームと呼ばれる六自由度のパラレルメカニズムを用いる構造を採用⁷⁾する。可動金型の位置と姿勢を制御するためには、金型の位置と姿勢から駆動アクチュエータの操作量を求める逆機構構演算が必要である。一般的に、シリアルメカニズムでは逆機構構解を求めることは困難であるが、パラレルメカニズムでは逆機構構解を容易に求めることができる⁸⁾。このため、これまでの押通し曲げ加工機に比べ、多軸制御のための計算がより簡便になるという特徴があり、また、機械的な回転中心が存在しないため、可動金型の回転中心を任意の位置に指定できるという利点がある。提案する曲げ加工機の概観をFig. 1に示す。

2.1 加工原理

本曲げ加工機の加工原理図を二次元の単純曲げを例に説明する。Fig. 2に示すように可動金型、固定金型に材料を貫通させた状態で、材料を長さ L_p だけ押通しながら、可動金型を任意の曲げ形状に必要な角度、位置に移動し加工を行う。このとき、可動金型は初期位置の中心軸からオフセット u だけ移動しているため、押し出し荷重 F_p ダイスオフセット u により加工荷重が作用する。この結果、曲げモーメント $M = F \cos \theta \cdot V + F_p \cdot u$ が作用し曲げ加工が行われる。Table 1に二次元曲げ加工におけるパラメータを示す。

2.2 加工機のシステム構成

試作した曲げ加工機の構造はFig. 3に示すように、加工ヘッド、パラレルメカニズムと管材の送り装置から構成される。動作プラットフォーム側に可動金型、ベース側に固定金型を取り付ける。可動金型の動作は、前述のようにパラレルメカニズムによる六自由度の駆動を採用している。すなわち、固定ベース上に六個の伸縮可能な油圧シリンダをユニバーサルジョイントにて結合し配置する。各油圧シリンダの上端もユニバーサルジョイントにて動作プラット

Fig. 1 Photo of the bending machine

Fig. 2 Basic bending method

Table 1 Bending Parameters of tubes

R	Bend radius [mm]
u	Off set [mm]
V	Distance between dies [mm]
θ	Angle of die [deg]
F	Working load [kN]
F_p	Pushing load [kN]
L_p	Feeding length [kN]

Fig. 3 Schematic of the bending machine

フォームに結合する。各シリンダの伸縮量を電気油圧サーボ機構により調節し、可動金型の位置と姿勢を制御する構造となっている。管材の送り装置は、油圧サーボモータ駆動のボールねじ、および磁歪式リニア変位センサより構成され、可動金型の動作に同期しながら、素材を必要な量だけ固定金型と可動金型に押通すことができる。Table 2に本

Table 2 Specifications of the bending machine

Bending tube with diameter : D	10 ~ 60 [mm]
Length of parts : L	up to 2300 [mm]
Bending radii : R/D	3 ~ ∞ [-]
Pushing force : F_p	150 [kN]
Pusher feeding speed	0 ~ 0.1 [m/s]
Off set : u	0 ~ 100 [mm]
Angle of die : θ	0 ~ 25 [deg]

加工機的主要仕様を示す。

2.3 逆機構解の導出

本加工機で利用する六自由度パラレルメカニズムをFig. 4に示す。ここで、可動金型が取り付けられた、パラレルメカニズムの動作プラットフォーム、固定ベースと六本の油圧シリンダに関する逆機構解を導出する。パラレルメカニズムでは以下に示すように、逆機構解が簡単に求められる。式(1)のように動作プラットフォームの回転行列を定義する。

$${}^A\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig. 4の関係より、ベクトル $\overline{AB_i}$ は式(2)となる。

$$\overline{AB_i} = \mathbf{P} + {}^A\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

以上より、与えられた可動金型の任意の位置と姿勢を実現するために必要な各油圧シリンダ伸縮長は式(3)により求められる。

$$d_i = \left| \overline{AB_i} \right| = \left[\mathbf{P}^T \mathbf{P} + [{}^B\mathbf{b}_i]^T [{}^B\mathbf{b}_i] + \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i + 2\mathbf{P}^T [{}^A\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{b}_i] - 2\mathbf{P}^T \mathbf{a}_i - 2[{}^A\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{b}_i]^T \mathbf{a}_i \right]^{1/2} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

3. 三次元曲げ加工と形状制御

三次元曲げ加工であっても、Fig. 5に示すようなねじりのない円管の加工であれば、本試作機ではFig. 2で示した二次元の加工原理を、素材を送り出し繰り返し適用することで、比較的容易に加工ができる。曲げ加工における管材の加工誤差の大きな影響要因はスプリングバックである。この問題に対しては、加工目標に比べ曲げ量が少なくなることを考慮し、予め曲げ量を大きめに与える加工パラメータを用いることにより、問題解決が可能である。Fig. 5に示すような曲げ加工では、予備的な実験を繰り返しTable 1の加工パラメータ修正することで、加工誤差を減少することができる。Fig. 5の医療機器用手すりの加工例でも最終的に目標である ± 1 mmの形状精度を実現することができた。

Fig. 4 Inverse kinematics of Stewart-Gough platform

Fig. 5 Experimental result of the 3D bending

しかし、複雑な三次元曲げではスプリングバックの影響を推定すること自体が難しく、加工形状制御および誤差修正のための新たな手法を検討する必要がある。ここでは、ねじりの加わった角管の三次元曲げとして特徴的な、螺旋形状を取り上げ形状制御および補正の一手法を提案する。

3.1 常螺旋曲げ加工

常螺旋をFig. 6, Table 3のように定義する。図で上方向に一周で進む長さを p (ピッチ)、螺旋の巻付く円柱半径 (螺旋半径) を r とし、螺旋角を β 、材料長さを l とする。ここで、 κ を曲率、 τ をねじれ率、 r を螺旋半径、 p を螺旋ピッチとするとFrenet-Serretの公式から式(4)、式(5)のようになる⁹⁾。

$$r = \frac{\kappa}{\tau^2 + \kappa^2} \quad (4)$$

$$p = 2\pi \sqrt{r \left(\frac{1}{\kappa} - 1 \right)} \quad (5)$$

式(4)、(5)から曲率 κ 、ねじれ率 τ を計算し、常螺旋の加工パラメータを求める。Fig. 2およびFig. 7から、加工パラメータと曲率 κ 、ねじれ率 τ の間には幾何学的関係から下

Fig. 6 Definition of the helix

Table 3 Definition of the helix parameters

κ	Curvature [-]
τ	Torsion [-]
p	Pitch [mm]
r	Radius [mm]
l	length [mm]
β	Angle of helix [rad]

式が成り立つ.

$$\kappa = \frac{2u}{V^2 + u^2} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{\theta'_z}{V} \quad (7)$$

$$\theta' = \sin^{-1}(\kappa \cdot V) \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta' \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

ここで、 V を一定として曲率 κ 、ねじれ率 τ を与えれば、加工形状制御に影響するパラメータは u と θ'_z である。式(6)でオフセット量 u が、式(7)で可動金型のねじり角 θ'_z が求められる。常螺旋曲げは上記に示されるように、Fig. 2の二次元曲げとFig. 7のねじり曲げの両加工パラメータの合成によって三次元加工が行われると考えることができる。

しかしながら、実際にはねじりに伴う三次元的なスプリングバックの影響により、Fig. 8のように角管のエッジ部分が螺旋外周面に沿わずにずれが生じてしまう。この問題を解決するために、新たに形状制御パラメータを導入する。

3.2 形状制御パラメータ

常螺旋の加工パラメータは、オフセット u 、可動金型の傾き角 θ' 、可動金型のねじり角 θ'_z である。ここで、螺旋外周面の方向を変化させる形状制御パラメータ α 、および加工補正パラメータ $u_x, u_y, \theta'_x, \theta'_y$ をTable 4のように定義する。以下に形状制御パラメータ α から加工補正パラメータ $u_x, u_y, \theta'_x, \theta'_y$ を導出する方法を示す。Fig. 9, 10のように、可動金型を原点位置から任意の位置に移動する場合を考える。Fig. 9に示すように金型傾き角 θ' を与え、オフセット u を与える方向を角度 α だけ回転すると、オフセット u を x 軸成分 u_x 、 y 軸成分 u_y として再定義する必要がある。Fig. 10に示す幾何学的な関係から任意の角 α に対する u_x, u_y は下式により求められる。

Fig. 7 Parameters of the torsion bending

Fig. 8 Spring back effects on the helix

Table 4 Bending parameters of the helix

u	Off set [mm]
V	Distance between dies [mm]
θ'	Angle of die [rad]
θ'_z	Torsion angle of die [rad]
α	3D Compensation parameter [rad]
u_x, u_y	Compensation parameter with u [mm]
θ'_x, θ'_y	Compensation parameter with θ' [rad]

Fig. 9 Definition of compensation parameters with the helix

Fig. 10 Definition of compensation parameters with the helix

$$u_x = u \cdot \cos(\alpha) \quad (9)$$

$$u_y = u \cdot \sin(\alpha) \quad (10)$$

次に傾き角 θ の可動金型に対して、角度 α 回転する操作を行う。Fig. 10のようにまず、可動金型の中心を原点 O' とし、任意の角度 θ 、定義した α をみたす原点からのベクトル $\vec{w}$ が示す先端を点 ω とし、ベクトル $\vec{w}$ と直交する原点からのベ

クトル ξ が示す先端を点 ξ として、原点 O' 、点 ω および ξ を含む平面の方程式を求める。求める方程点式を式(11)とすると、

$$ax'+by'+cz'+d=0 \quad (11)$$

この方程式が原点 O' (0, 0, 0)、点 ω ($\cos\alpha$, $\sin\alpha$, $\tan\theta$)、 ξ ($\cos(\alpha+\pi/2)$, $\sin(\alpha+\pi/2)$, 0) を通ることから、

$$\alpha'=\alpha+\frac{\pi}{2} \text{とおくと、}$$

$$-\left(\frac{\sin(\alpha')}{\cos(\alpha')}\right)x'+y'+\left(\frac{\sin(\alpha')\cos(\alpha)-\cos(\alpha')\sin(\alpha)}{\sin(\alpha')\tan(\theta')}\right)z'=0 \quad (12)$$

となる。 $y'=0$ として、式(12)の平面と $x'-y'$ 平面が交わる点を求めると式(13)となる。

$$z'=\left(\frac{\sin(\alpha')\tan(\theta')}{\sin(\alpha')\cos(\alpha)-\cos(\alpha')\sin(\alpha)}\right)x' \quad (13)$$

式(13)よりより、 $x'-z'$ 平面上の任意平面の傾き角すなわち可動金型の傾き角 θ'_x を求めると式(14)となる。

$$\theta'_x=\tan^{-1}\left(\frac{\sin(\alpha')\tan(\theta')}{\sin(\alpha')\cos(\alpha)-\cos(\alpha')\sin(\alpha)}\right) \quad (14)$$

ただし逆三角関数の定義から、

$$-\frac{\pi}{2}<\theta'_x<\frac{\pi}{2} \quad (15)$$

である。

可動金型の傾き角 θ'_y は、式(12)で $x'=0$ として、同様に求められる。

$$\theta'_y=\tan^{-1}\left(\frac{\cos(\alpha')\tan(\theta')}{\cos(\alpha')\sin(\alpha)-\sin(\alpha')\cos(\alpha)}\right) \quad (16)$$

$$-\frac{\pi}{2}<\theta'_y<\frac{\pi}{2} \quad (17)$$

4. 実験結果

提案する形状制御パラメータ α を加えることにより、螺旋加工外周面の形状制御が実際に可能であるか確認実験を行った。被加工物はいずれも $\square=20$ [mm], A6063の軟調質材 (O材) であり、式(6)から(8)の螺旋パラメータは同一で、Table 4に定義した形状制御パラメータおよび加工補正パラメータを用いて曲げ加工を実施した。第一ステップとして、 $\alpha=0$ すなわち形状制御をおこなわずに加工を実施した。螺旋加工は二次元曲げとねじり曲げの合成によって行われると考え、単純曲げおよび単純ねじりについておこなった予備実験から曲率 κ 、ねじれ率 τ について修正量を推定し、形状誤差を修正していった。Fig. 11に加工結果の一例を示す。その結果、幾何学的な関係から求めた螺旋軌道値と実験結果は、ほぼ一致するようになった。しかしながら、Fig. 11の外周面を拡大したFig. 12に示すように、三次元的なスプリングバックの影響による、螺旋外周面のエッジ部分に生じるずれの問題は未解決である。そこで第二ステップとして導出した形状制御パラメータ α を変化させて実験を行った。Fig. 13は $\alpha=5.25^\circ$ とした場合の実験結果で

あり、螺旋外周面のエッジ部分のずれが解消されていることがわかる。Fig. 14では $\alpha=50.75^\circ$ として、意図的に螺旋外周面のずれを大きくしようとした場合であり、エッジ部分が外周面に対し鋭角に立ち上がる形状となっている。

以上により、従来は困難であった、三次元的なスプリングバックを、形状制御パラメータを新たに導入することで、制御し補正することが可能であることが確かめられた。本実験例は断面形状が矩形の管材の場合であるが、断面形状が非円形であれば、どのような形状であっても、提案した形状制御パラメータの適用は可能である。さらに、加工形状も螺旋形状に限定するものではなく、任意の三次元形状の加工に適用が可能である。

5. 結 言

本論文では、金属管やアルミ押出し材などの長尺材を、複雑な三次元形状に加工することが可能な、パラレルメカニズムを用いた曲げ加工機を提案した。本曲げ加工機は、電動アクチュエータに比べコンパクトに大出力が得られる油圧駆動パラレルメカニズムにより、可動金型の位置と姿勢を制御するため、加工形状制御の自由度が高く、円形、非円形、開断面などの素材を、任意の三次元形状に曲げることができる。ねじりを伴う三次元曲げの一例として、アルミ角管の螺旋形状加工を取り上げ、形状創生のためのパラメータ導出、三次元形状制御パラメータおよび加工補正

Fig. 11 Experiments of the helix bending

Fig. 12 without compensation for the spring back ($\alpha=0$)

Fig. 13 Compensation for the spring back ($\alpha = 5.25^\circ$) Fig. 14 Over compensation for the spring back ($\alpha = 50.75^\circ$)

パラメータの提案を行った。提案した形状制御パラメータを用いれば、従来は困難であった、三次元的なスプリングバックの影響を制御し補正することが可能である。三次元形状制御パラメータは、管材の断面形状が非円形であれば原理的に任意の三次元加工形状に適用が可能である。

今後は、現在 $\pm 1\text{ mm}$ の加工精度向上を目的とした、インプロセス計測による加工形状補正の検討を行い、普及が期

待されているアルミ押出し材を対象とした、三次元曲げ加工の実用化を目指す。

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(財)JKAの補助金を受けて実施した。ご支援いただいた関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会編：チューブフォーミング，コロナ社，1/4 (1992)
- 2) 高橋和仁，村田眞：管の曲げ加工技術の動向，軽金属，56-5，283/289 (2006)
- 3) 村田眞，大橋信仁，鈴木秀雄：円管の新しいフレキシブルな押通し曲げ，日本機械学会論文集，C編 55-517，2488/2492 (1989)
- 4) 軽金属学会研究委員会：6061，6063アルミニウム合金押出型材の曲げ加工における精度と限界，研究部会報告書，36，40/46 (1999)
- 5) 貝田一浩，平野正和，藤井孝人，吉田正敏：アルミ押出型材の曲げ加工技術，神戸製鋼技報，47-2，17/20 (1997)
- 6) 浜野秀光：アルミニウム押出し型材の押通し曲げ加工に関する研究，東京都立大学学位論文，115/128 (2002)
- 7) 五嶋裕之，一柳健：パラレルメカニズムの技術を用いた3次元曲げ加工機，フルードパワーシステム，36-6，16/20 (2005)
- 8) 金嘯海，古屋信幸，牧野洋：スチュワートプラットフォーム機構の順機構解に関する研究，精密工学会誌，62-5，732/736 (1996)
- 9) 小林昭七：曲線と曲面の微分幾何，裳華房，24/25 (1977)