パイプの3次元曲げ加工機用大発生力把持機構の開発

Development of Gripping Mechanism with large gripping force for a draw pipe bender which fabricates complex 3 dimensional shape pipes

正 樋口 勝 (東工大) 〇学 石井 利絵 (東工大)
正 武田 行生 (東工大)

Masaru HIGUCHI, Tokyo Institute of Technology _masaru@mech.titech.ac.jp
Rie ISHII, Tokyo Institute of Technology
Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology

This paper proposes a gripping mechanism with large gripping force for a draw pipe bender which fabricates complex 3 dimensional shape pipes. In order to adapt complex 3-dimensional shape of pipe and generate low gripping pressure, the gripper is constructed of multiple gripping unites. To generate large gripping force with small and simple mechanism, gripping unites utilizes self energizing effect. Its basic characteristics are investigated theoretically and experimentally.

Key Words: Gripper, Machine Design, Self energizing effect, Pipe bender

1. 緒言

現在、管材の曲げ加工物はその質量に対して剛性が高いため、軽量化や製造のコストダウンに適しており、その用途は自動車、航空機をはじめ機械部品として多くの分野に広がっている。そのため、管材に施す塑性加工法の一つである曲げ加工法として多くの方法が開発、適用されている。中でも可動押通し曲げ加工法は断面形状に合わせた一對の金型に管材を押通しながら一方の金型を所望の位置に動かすことで曲げ加工を行うことで、複雑な三次元形状の曲げ加工を従来の方法では曲げ形状ごとに必要であった個別の金型を必要とせずに行うことが可能である⁽¹⁾。しかし、この方法ではパイプに常に圧縮荷重が作用しているため、パイプの曲げ内側にしわが発生しやすく小さな曲率半径ではでの加工が困難であるという問題がある。

そこで本研究では、小さな曲率半径でしわの発生しない曲げ加工を実現するために、図1に示す既存の押通し曲げ加工機⁽¹⁾のプラットフォームに把持機構を取付け、これにより加工後のパイプを把持し、パイプを引張りながら曲げ加工を行うことを考え、これに用いる把持機構の開発を目的とする。把持機構には、1kN オーダーの大きな引張力、曲率半径/パイプ直径=2で加工されたパイプの把持、パイプに圧痕が残らない低い面圧での把持、プラットフォームに取り付け可能な大きさ、が要求される。把持機構としては、能動義手⁽²⁾、ロボットハンド^{(3)~(5)}、電動チャック⁽⁶⁾があるが、いずれも複雑な形状の把持と十分な把持力のどちらか一方を満たさない。

Fig.1 CNC Bending Machine using 6-axis Parallel Kinematics

本報告では上述の要求仕様を満たすための把持機構を提案する。そして、その設計を可能とするために設計パラメータと把持力・引張力を含む機構各部に作用する力の関係を導出する。さらに、実験機により設計パラメータと引張力・把持力の関係を把握し、提案した把持機構の有効性を検討している。

2. 把持機構の提案

要求仕様を満たす把持機構を考えるにあたり、(1)複雑な形状を低面圧で把持するために把持機構を複数のユニットで構成する。(2)大きな把持力を得るために各ユニットは自己倍力効果を利用できる構造とする。(3)1つのユニットの支持力が次のユニットの入力になる構成とすることで、1つの入力ですべてのユニットを作用できる構造とする。の3つのアイデアに基づき、図2に示す把持機構を提案する。図2は把持機構の構造を理解しやすくするために、引張り曲げ加工機であるパラレルマニピュレータに対して把持機構を大きく描いてある。把持機構はパラレルマニピュレータのプラットフォームに取り付けられる。パイプはベースとプラットフォームの2つの金型(ダイス)により軸方向以外の運動が拘束されているので、把持機構によりパイプを把持しプラットフォームを図中の矢印の方向へ動かすことでパイプを引張り曲げ加工することができる。把持機構は複数のユニットと先端の入力装置から構成されており、各ユニットはメインローラ、サブローラ、スウィングリンク、コネクティングリンクから構成され

Fig.2 Composition of gripping mechanism

ている。パイプを把持するメインローラはスウィングリンクに固定されており、サブローラはスウィングアーム、コネクティングアームと相対回転運動できる。ユニットの構成、ユニットに作用するちからおよび設計パラメータを図3に示す。入力 f_i により把持力 f_n が作用し、パイプを引張ることによって引張力 f_i が作用する。メインローラとスウィングアーム(これらは一体になっている)のサブローラの中心周りのモーメントを考えると、 f_i によりメインローラは更にパイプに押し付けられ把持力が増加する。これが自己倍力効果である。滑る直前の最大の引張力となる $f_i = \mu f_n$ の場合、このモーメントの釣合いを解くことにより f_i と f_n の関係は以下の通りになる。

$$f_n = \frac{\cos(\alpha_i - \alpha_m)}{\cos \alpha_m - \mu(\sin \alpha_m + \frac{1}{\gamma})} f_i \quad \dots(1)$$

f_i と f_n の関係はメインローラ半径 r_m およびスウィングリンク長さ l_m そのものではなく、その比 $\gamma = l_m / r_m$ に依存することが分かる。(1)式より把持部の摩擦係数 μ を含む項により分母が小さくなることで f_i に対する f_n が増大することからも自己倍力効果を説明できる。サブローラと次のユニットのメインローラと接触部に作用する力 f_o は以下の通りになり、

$$f_o = \frac{(\mu f_n + f_i \sin \alpha_i)}{\sin \alpha_o} \quad \dots(2)$$

これが次のユニットの入力となり、これにより先頭のユニットに入力を与えると次のユニットに順次力が伝達し全てのユニットを作動させることができる。

3. 力学解析

3.1 設計パラメータの拘束条件 把持機構の設計を可能とするために設計パラメータと把持力・引張力の関係を把握する。把持機構が機能するために図3に示す設計パラメータに以下の幾何学的拘束条件を設定する。

(1) サブローラと次のユニットのメインローラの接触

$$\beta \geq \gamma \sin \alpha_m - 1 \quad \dots(3)$$

ここで、 $\beta = r_s / r_m$ である。

(2) 同じユニットのメインローラとサブローラの非干渉

$$\beta \leq \gamma - 1 \quad \dots(4)$$

(3) 2つのユニットのメインローラ同士の非干渉

$$\gamma \cos \alpha_m + (1 + \beta) \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{\gamma \sin \alpha_m}{1 + \beta} \right) \right\} - 2 \geq 0 \quad \dots(5)$$

(4) 次のユニットへの力の伝達

$$0 < \left(\frac{\gamma \sin \alpha_m}{1 + \beta} \right) < 1 \quad \dots(6)$$

Fig.3 Geometric parameters of gripping mechanism

(5) 入力による把持力の発生(入力操作無しに把持しない)

$$\cos \alpha_m - \mu(\sin \alpha_m + \frac{1}{\gamma}) \geq 0 \quad \dots(7)$$

3.2 ユニット単体での力解析

把持機構の設計を可能とするために設計パラメータと把持力 f_n の関係を把握する。まず、図3に示すユニット単体で考える。基準パラメータは表1に示す通りであり、まず設計パラメータと把持力の関係を解析した。図4(a)に α_m と把持力の関係を図4(b)に摩擦係数 μ と把持力の関係を示す。なお把持力は入力との比 f_n / f_i で示してある。 α_m が大きくなるに従い自己倍力効果の効きが強くなるため把持力は大きくなるが、 α_m 大きいほど摩擦係数 μ の変化に対する把持力の感度が高いことが分かる。摩擦係数 μ の変化に対して安定して自己倍力効果を利用できる適切な α_m を設定する必要があることが分かる。なお、図には示していないが γ を1~4の範囲で変化させた結果、殆ど把持力へ影響を及ぼさないことが分かった。次に設計パラメータと次のユニットの入力 f_o の関係を解析した。図5(a)に β と f_o の関係を図5(b)に γ と f_o の関係を示す。なお力は入力との比 f_o / f_i で示してある。 α_m が大きくなるに従い β および γ を変化させることで f_o の値を設定できることが分かる。 α_m および μ と f_o の関係は把持力 f_n と同様の傾向を示したので省略してある。これらより α_m により把持力を決めた後でも β および γ を適切に設計することで目標とする次のユニットの入力 f_o を実現できることが分かる。

Table1 Design parameters of gripping mechanism for analysis

α_i	30°	f_i	1.0	β	1.0
α_m	30°	μ	0.2	γ	2.0

Fig.4 Relationship between design parameters and gripping force

Fig.5 Relationship between design parameters and input force of next unit

3.3 ユニット毎の把持力の分配方法

把持部の面圧が最低になるユニット毎の把持力が全てのユニットにおいて等しくなるようにパラメータを設定した場合と等しい場合の2つの把持力の分配方法を用いた場合について、設計パラメータと把持力の関係を解析した。まず把持力が等しい場合のユニット番号 N と α_m の関係を図6に示す。図6(a)より把持力 f_n を等しくするためには1番目のユニットの入力 f_{i1} によってはユニット毎に α_m を大きく変化させて設定する必要がある。第3.2節で述べたように α_m が大きい場合は自己倍力効果が強く作用しているために摩擦係数 μ の変化に把持力 f_n が敏感になるため、 μ が変化した場合に f_n を等しくすることが難しくなる。更に図6(b)より β の値によっては拘束条件を満たすようにパラメータを設定できず複数のユニットを用いることができない場合が存在する。なお γ についても β と同様にその値によって複数のユニットを用いることができない場合が存在する。次に設計パラメータが等しい場合についても同様の解析をした結果を図7に示す。図よりユニット番号 N が大きくなるに従い把持力が増大するが、 β および γ を適切に設定することで増大する割合を小さくすることができる。これは自己倍力効果を余り利用しない場合である。そのため大きな把持力を得るためには自己倍力効果の効きの強さと把持力の分布を考えてパラメータを設定する必要があることが分かる。

3.4 設計パラメータの決定方法

α_i は1つ前のユニットにより定まっており、摩擦係数 μ は把持部の材質に依存するパラメータで、ユニットをできるだけ小さくするために β および γ はできるだけ小さくしたいので、(1)式より自己倍力効果の効きは α_m で設定することとする。この場合まず(2)式を満たすよう β および γ を仮定し、(7)式を満たすように目標とする f_n となるように α_m を決定し、(3)~(6)式を満たすか確認する。全ての拘束条件を満たし、かつ次のユニットの入力が目

標値となるように β および γ を仮定し直し上述の作業を繰返すことでパラメータを決定する。

4. 実験

4.1 把持部の摩擦係数

自己倍力効果を利用するために把持部の摩擦係数の値は把持力・引張力の特性を把握する上で重要である。そこで、ローラ単体をパイプに接触させて最大静止摩擦係数を把握する実験を行った。ローラは半径7.5mmのアルミ製である。その結果平均0.18、最大0.27、最小0.11と大きくばらついていた。安定した把持力を実現するためには摩擦係数が安定するようなローラの材質にする必要があると考える。

4.2 実験機

設計パラメータの把持力・引張力へ及ぼす影響を把握するために表2に示すパラメータを有する3種類の実験機を製作し、把持力および引張力の測定を行った。実験機AおよびCの概観を図8に示す。実験機Aはコネクティングリンクに両端に樹脂製のロッドエンドを付けたアルミ製のロッドを、実験機Bは両端に鋼製のロッドエンドを付けたアルミ製のロッドを、実験機Cはアルミ製の板を使用した。いずれの実験機もユニットの数は製作の都合上複数用いることの効果を把握できる最小の数として4とし、全てのユニットで同じパラメータを用いた。最初のユニットへの入力は最大トルク0.29N・mのラジコンサーボ駆動のトグル機構により行った。実験装置の構成を図9に示す。パイプに貼り付けたひずみゲージにより把持力を測定し、引張力はパイプに取り付けたロードセルにより測定し、レーザ変位計によりパイプの運動開始を検出して最大引張力を測定した。リフターに把持機構を設置し、把持機構を持ち上げることで引張り荷重を発生させた。

4.3 把持力の分布

図10に実験機AおよびBの各ユニットの把持力の実験結果と、1番目のユニットの把持力から2番目以降のユニットの把持力を計算した結果を示す。実験機Aではパイプに張力を加える前の $N=1$ の把持力は平均で120N程度であったが、図10(a)よりパイプに張力を作用させること

Table 2 Design parameters of prototype gripping mechanism

	A	B	C
r_m	7.5mm	7.5mm	7.5mm
r_s	7.5mm	7.5mm	15.0mm
l_m	16.0mm	16.0mm	23.5mm
l_s	58.0mm	45.0mm	62.0mm

(a) Input force of the first unit f_{i1} / f_n (b) Ratio of roller radius β

Fig.6 Relationship between unit number N and swinging link angle α_m (When all units generate equal gripping force)

(a) Ratio of roller radius β (b) Ratio of swinging link γ

Fig.7 Relationship between unit number N and gripping force (When all units have same parameters)

(a)Type A

(b)Type C

Fig.8 Prototype of gripping mechanism

で平均 200N 程度まで増大しており自己倍力効果を利用して把持していることが分かる。図 10(b)より実験機 B についても同様のことが分かる。また、実験機 A、B とも実験結果および計算結果とも $N=2$ で把持力が小さくなりそれ以降は把持力が増大する傾向を示している。これより、1つのユニットへの入力ですべてのユニットへ力が伝達し把持力を発生させることができることが分かる。実験機 A に対して実験機 B は 2 番目以降のユニットの把持力が小さいが、これは実験機 B の方がコネクティングリンク長 l_s が短く α_m が小さくなっているために自己倍力効果が小さくなっているためであり、 α_m によって自己倍力効果の効きを変化させられることが分かる。

4.5 引張力 各実験機により発生した引張力の実験値の平均および計算値を表 3 に示す。実験装置の引張力の測定範囲が 800N であったため、実験機 A はそれ以上の引張力を発生していたものの 800N としてある。実験機 B の実験値は計算値にほぼ等しいことが分かり、第 2 章で導出した式により引張力が見積もれることが分かる。しかし実験機 C では計算値よりも小さい値しか実現できておらず、異なるコネクティングリンクを用いた影響によるものと考えられる。

Fig.9 Construction of Experimental apparatus

Fig.10 Relationship between unit number N and gripping force f_n

Table 3 Tensile force of prototype gripping mechanism

	A	B	C
Experiment	800kN	170N	130N
Calculated	1100kN	164N	328N

5. 結言

本報告では引張り曲げ加工機用の把持機構を開発するために、機構の提案およびその基本特性の解析的・実験的把握を行った。得られた結果を以下の通りである。

(1)低面圧かつ複雑な形状のパイプに対応するために把持機構を複数のユニットを組合せることで構成し、小形かつ大把持力を得るために各ユニットを自己倍力効果が利用でき、さらに 1 つのユニットの支持力が次のユニットの入力になる構造とすることで、1つの入力ですべてのユニットを作動する把持機構を提案した。

(2)ユニット単体において、スウィングリンクがパイプとなす角 α_m により自己倍力効果の効きを調整し目標とする把持力を設定できることを示した。また、サブローラの半径およびスウィングリンクの長さを調整することで、次のユニットの入力 f_0 の大きさを設定できることを示した。

(3)ユニットを複数用いる場合、各ユニットでの把持力の分布を一定にする場合はユニットごとに設計パラメータが大きく変化するために拘束条件を満たすことが難しく多くのユニットから構成することができない場合がある。全ユニットでパラメータを一定にする場合、ユニット番号が大きくなるに従い把持力が増大するが、 β および γ によりその増大する割合を調整することができることを示した。

(4)実験により自己倍力効果を利用できていることおよび入力が次のユニットに順次伝達され各ユニットが把持力を発生していることが確認できた。また、設計パラメータを変更することで自己倍力効果の効きを変化させ入力に対する各ユニットの把持力を調整できることが分かった。更に、ユニット番号に対する把持力の変化の特徴が計算値と実験値が同じ傾向を示した。以上より提案した把持機構の有効性を示すことができた。

なお、今後の課題として(1)提案した機構はパイプの 2 次元の曲げにのみ対応していることから 3 次元曲げに対応した機構の提案、(2)直線以外のパイプの形状の場合についての幾何学的・力学的解析、(3)安定した摩擦力の実現、(4)最適な機構設計法の確立、について検討していく予定である。

文 献

- [1] 片井 博之, 一柳 健, "6 軸パラレルメカニズムを用いた CNC 曲げ加工機の開発", 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集, S49-2, 2004
- [2] J.U.Chu, D.H.Jung, Y.J.Lee, "Design and Control of a Multifunction Myoelectric Hand with Nes Adaptive Grasping and Self-locking Mechanism", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.19-23,2008.
- [3] G.Carboni, M.Ceccarelli, "Design of LARM Hand :Problems and Solutions", *J. of Control Engineering and Applied Informatics*, Vol.10-2, pp. 39-46.2008.
- [4] J.L.Pons, E.Rocon, R.D.Reynaerts, B.Saro, S.Levin, W.Van moorlegheem, "The Manus-Hand Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis : Mechanical and Manipulation Aspects", *Autonomous Robotics*, Vol.16, 143-163,2004.
- [5] Takeshi Takaki, Toru Omata, "Grasp Force Magnifying Mechanism for Parallel Jaw Grippers", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.10-14, 2007.
- [6] 田中 秀岳, 安田 嘉和, 鈴木 直彦, 坂谷 勝明, 安井 武司, 平尾 政利, "CNC 旋盤用電動チャックシステムの開発(第一報)", 精密工学会誌, Vol.70-6, pp.838-842, 2004.