

ロボットによるスピニング加工の研究

— 位置/力ハイブリッド制御による加工の特性 —

Robotic Metal Spinning

— Forming Characteristics in Hybrid Position/Force Control —

○正 荒井 裕彦 (産総研)

Hirohiko ARAI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Metal spinning is a plasticity forming process that forms a metal sheet or tube by forcing the metal onto a rotating mandrel using a roller tool. This is a study on metal spinning applying robot control techniques such as force feedback control with the aim to develop flexible and intelligent forming processes, and to expand a new application area for robot control. The author proposes applying hybrid position/force control for shear spinning, which is free from fine adjustment of the clearance between the roller and mandrel. The forming characteristics of the proposed method are experimentally investigated.

Key words: metal spinning, plasticity forming, hybrid position/force control

1. 緒言

スピニング加工⁽¹⁾⁽²⁾とは、回転する成形型(マンドレル)に板状や管状の素材(ブランク)を加工ローラやへらで押し付けて成形する塑性加工の一手法である(Fig. 1)。金属を材料とする多様なシェル状の部品・製品の成形加工法として広く用いられている。また、この加工法はNC自動機(スピニングマシン)のみでなく熟練作業者による人力の作業(へら絞り)としても行われ、高度なものづくりの技能の一つとされている。

著者は、力フィードバック制御などのロボット制御技術を適用したスピニング加工について研究を進めている⁽³⁾⁽⁴⁾。加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかりつつ、ロボット制御技術の新たな応用分野開拓を目指す。

へら絞りでは作業者の感覚、特にローラを介して伝わる力の感覚が重要な役割を果たす。またスピニング加工は局所変形による加工のため、他の塑性加工と比べて加工力が高くて小さい。制御パラメータが多く加工の自由度が高い点でもロボットに適した作業である。手作業による生産が製造業として成立していることからわかるように、多品種少量生産かつ高付加価値の加工法であり、力制御ロボット導入の採算性は高いと予想される。

これまでに、位置/力ハイブリッド制御を用いた加工法を提案し、加工実験により効果を確認した⁽⁴⁾。この方法によりローラとマンドレル間の隙間の微調整が不要となる。本報告では、位置/力ハイブリッド制御において加工パラメータを変動させた際の加工特性の変化を実験的に調べ、良好な成形結果を得るためのパラメータ設定の指針を探る。

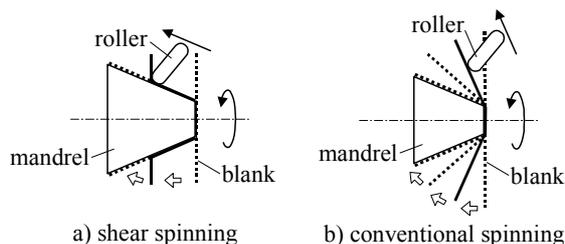


Fig. 1 Metal Spinning

2. 実験装置

スピニング加工の基礎実験を行うために試作した実験装置を Fig. 2 に示す。x 軸, y 軸の直動送りにはそれぞれ DC サーボモータ (60W) によりボールねじを駆動している。減速機付 DC サーボモータ (120W) によりマンドレル (θ 軸) を回転させる。 θ 軸は x 軸に対し 60° 傾けて取り付けられている。加工ローラは直径 70mm, ローラ丸み半径 9.5mm, 材質は工具鋼 (SKD11, 焼入) である。ローラと y 軸の間に 6 軸力センサを装着する。Fig. 3 に加工の様子を示す。また Fig. 4 はブランク及び成形結果である。

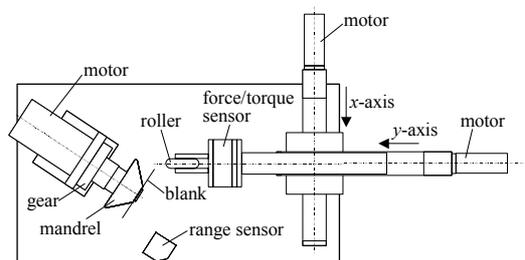


Fig. 2 Experimental Setup

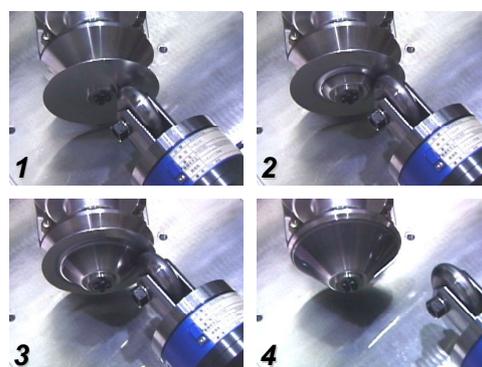


Fig. 3 Forming Experiment

http://staff.aist.go.jp/h.arai/spin_j.html

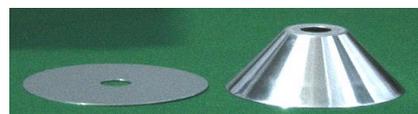


Fig. 4 Blank and Product

3. 位置/力ハイブリッド制御によるしごきスピニング

本研究ではスピニング加工の手法のうち、しごきスピニング（ローラをマンドレルに沿って送り、素材をしごいて成形する方法）を扱う。しごきスピニングの場合、マンドレル側面の回転軸に対する傾きを α 、元のブランクの厚さを t_0 とおくと、成形後の製品の肉厚 t は

$$t = t_0 \sin \alpha \quad (1)$$

となることが知られている⁽¹⁾。NC自動機ではマンドレルとローラの間隙は通常この値と等しく設定される。

前報⁽⁴⁾ではまず、隙間の設定が成形結果に与える影響を実験的に調べた。隙間が過大となる場合、フランジ（素材のうち未加工の平板部分）にしわの発生が観察された。また、加工力による装置の変形のため、正確な隙間の設定が実際にはかなり難しいことも見出された。

このような隙間の設定の問題は、加工ローラを位置ベースで制御するために生ずる。製品の目標形状は素材をマンドレルに密着させることで得られるから、マンドレルとローラ間に製品肉厚分の隙間を設けるのではなく、適切な力で素材をマンドレルに押し付けてやればよい。そこで次に力フィードバック制御の適用を試みた。

力制御の手法としては、位置/力ハイブリッド制御を用いた。マンドレル側面に平行な X 方向のローラ送り速度 V_x に関しては位置制御により一定速 V_{xd} で加工ローラを移動させる。マンドレル側面に対する法線方向 Y については加工ローラの押し付け力 F_y が一定値 F_{yd} となるように制御する（Fig. 5）。位置制御についてはPDフィードバック、力制御についてはPIフィードバックを用いた。制御則は次のように表される。

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_F \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} k_{vx}(V_{xd} - V_x) + k_{px}(V_{xd}t - X) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_F = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} 0 \\ F_{yd} + k_{pf}(F_{yd} - F_y) + k_{if} \int (F_{yd} - F_y) dt \end{bmatrix}$$

ただし、 f_x, f_y は x, y 軸の駆動力、 \mathbf{M} は x, y 軸の慣性行列、 \mathbf{J} は xy 座標と XY 座標間の変換行列、 $k_{vx}, k_{px}, k_{pf}, k_{if}$ はフィードバックゲインである。

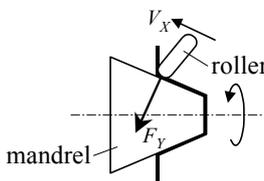


Fig. 5 Hybrid Position/Force Control

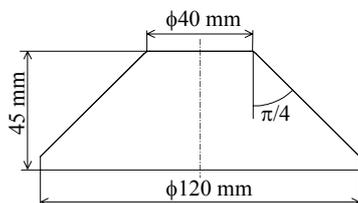


Fig. 6 Mandrel

上記の制御側を用いて実際にアルミ薄板の成形加工を行い、その効果を確認した。実験に用いたマンドレル（ステンレス鋼, SUS304）の断面形状を Fig. 6 に示す。マンドレル（ θ 軸）は一定角速度で回転させた。ブランクは直径 120mm、厚さ 0.78mm のアルミニウム円板 (A1050-0 材) である。加工面の潤滑のために噴霧式潤滑剤 CRC5-56 を塗布した。最初に加工ローラがブランクに接触し素材がローラの曲面部分に合わせて凹むまでは x, y 軸を位置制御し、その後位置/力ハイブリッド制御に切り替えて加工を行った。

加工ローラの送り速度 V_x は0.1mm/s、マンドレルの角速度 ω は60rpm、ローラの押し付け力 F_y は400Nとした。加工の際にローラが素材に加える加工力を Fig. 7 に示す。 F_x はマンドレル側面に沿ったローラ送り方向の成分、 F_y はマンドレル側面に対する法線方向の成分、 F_z はマンドレル回転円周の接線方向の成分である。ローラの押し付け力 F_y は力制御によりほぼ400Nに保たれている。 F_x, F_z はそれぞれ約120N、約4Nとなった。

Fig. 8 は加工結果の製品である。フランジにはしわが発生していない。製品内側の表面もマンドレルに押し付けられて平滑になり、良好な仕上がりが見られた。マイクロメーターで実測した製品の肉厚は約0.55mmである。(1)式による肉厚は $0.78 \sin 45^\circ = 0.552$ mmであるから、ほぼ理論値と等しい肉厚が得られている。

この手法を用いることにより、マンドレルとローラの間隙を設定することなくスピニング加工が行える。隙間の設定はローラ押し付け力に置き換えられ、装置の剛性に関わりなく同じ設定値を用いることができる。また、ローラとマンドレルの厳密な位置合わせが不要であるため、加工の段取りが非常に容易になると考えられる。

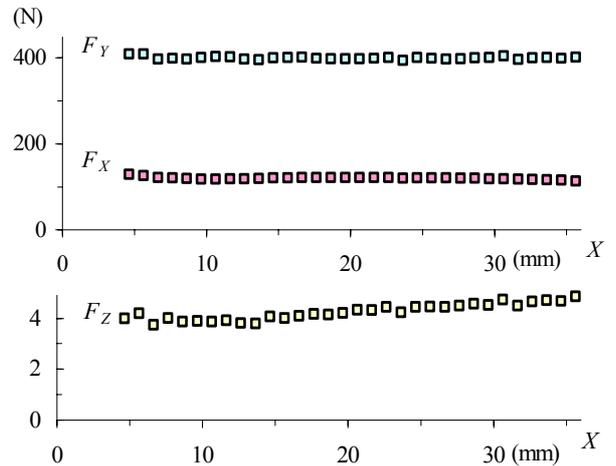


Fig. 7 Forming Force

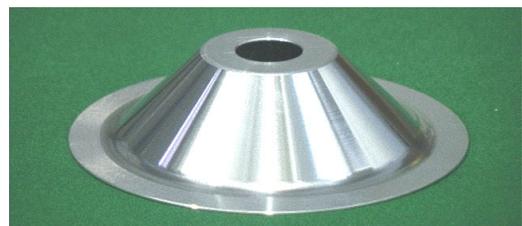


Fig. 8 Product by Force Control

4. 加工パラメータの変動による加工特性の変化

ここでは、位置/力ハイブリッド制御を用いたしごきスピニングにおいて、良好な成形を行うためのパラメータ設定の目安を得ることを目的として、種々の加工条件の下で成形加工を行い、加工特性の変化を調べる。

変化させた加工パラメータは、ローラの送り速度 V_X 、マンドレルの角速度 ω 、及びローラの押し付け力 F_Y である。変化の範囲は $0.05 < V_X < 0.4$ [mm/s], $30 < \omega < 240$ [rpm], $250 < F_Y < 500$ [N]とした。加工中の各軸変位及び力センサ信号を記録した。

4.1 押し付け力による変化 はじめに、ローラの押し付け力 F_Y を変化させた。 $V_X = 0.1$ [mm/s], $\omega = 60$ [rpm]として、 $F_Y = 250, 300, 350, 400, 450, 500$ [N]で加工を行った。これらのうち $F_Y = 250, 300$ [N]では加工に失敗した。Fig. 9はモータのエンコーダで計測された各軸変位に基づく加工ローラの軌跡である。Yはマンドレル側面とローラの距離を表す。 $F_Y = 250, 300$ [N]では、ローラが押し付け力の不足により押し戻されてマンドレルから離れ、所定の形状が得られない。ワークがマンドレル側面で支えられないため、最終的にはローラで押し潰されて大きく変形する。ただし、加工の途中では、位置制御による加工においてしばしば観察されたフランジのしわ発生はあまり見られなかった。

それ以外の場合については加工が正常に終了した。それらについて、 $X = 20$ [mm] 付近での平均加工力を比較した (Fig. 10)。ローラ押し付け力 F_Y が大きくなるほど、ローラ送り方向成分 F_X 、接線方向成分 F_Z ともに小さくなる傾向が見られた。また、製品肉厚は $0.55 \sim 0.56$ [mm] の範囲で、(1)式に近い値となる。製品内側表面は押し付け力が大きいほどマンドレルに密着して平滑となり光沢が見られた。実験装置の性能上、押し付け力の上限はわからなかったが、良好な成形が可能な押し付け力にはプラス側にかなりの幅があることが明らかになった。

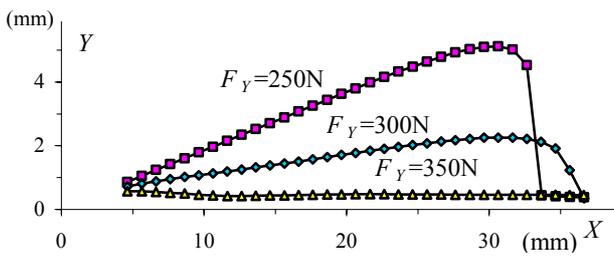


Fig. 9 Path of Roller

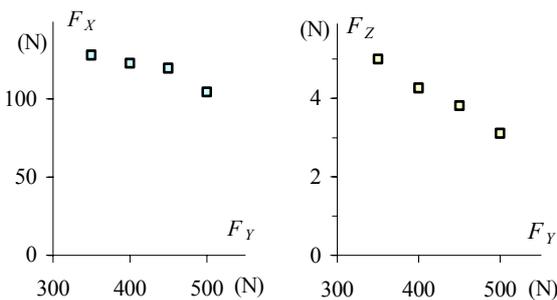


Fig. 10 Effect of F_Y on Forming Force F_X, F_Z

4.2 ローラ送り速度による変化 次に、ローラの送り速度 V_X を変化させた。 $\omega = 60$ [rpm], $F_Y = 400$ [N]として、 $V_X = 0.05, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5$ [mm/s]で加工を行った。これらのうち $V_X = 0.4, 0.5$ [mm/s]では加工に失敗した。ローラの反対側でワークがマンドレルから浮いて形状が狂い、加工面も同心円状に浅い凹凸が生じる。加工中にはきしみ音が発生し、その際に加工力の変動も観察された。

平均加工力の比較を Fig. 11 に示す。送り速度 V_X が大きくなるほどローラ送り方向成分 F_X は大きくなる。また接線方向成分 F_Z は V_X にほぼ比例する。製品肉厚は $0.55 \sim 0.58$ [mm]で、 V_X が小さいほど(1)式に近い値となる。

4.3 マンドレル角速度による変化 さらに、マンドレルの角速度 ω による変化を調べた。 $V_X = 0.4$ [mm/s], $F_Y = 400$ [N]として、 $\omega = 60, 120, 180, 240$ [rpm]で加工を行った。これらのうち $\omega = 60$ [rpm]以外では加工に成功した。平均加工力の比較を Fig. 12 に示す。前節の結果と比較しやすいように、マンドレル1回転あたりのローラ送り量 ΔX を横軸にとった。 ΔX が大きくなるほどローラ送り方向成分 F_X は大きくなる。また接線方向成分 F_Z は ΔX にほぼ比例する。製品肉厚は $0.55 \sim 0.57$ [mm]で、 ΔX が小さいほど (ω が大きいほど) (1)式に近い値となる。

位置制御による加工では、加工特性はローラ送り速度 V_X 及びマンドレル角速度 ω で決定されるマンドレル1回転あたりのローラ送り量 ΔX に依存する⁽¹⁾。そこで、 $\Delta X = 0.1$ [mm]となる $(V_X, \omega) = (0.1, 60), (0.4, 240)$ の組み合わせと $\Delta X = 0.2$ [mm]となる $(V_X, \omega) = (0.2, 60), (0.4, 120)$ の組み合わせについて加工力を比較した (Fig. 13)。ローラ押し付け力は $F_Y = 400$ [N]とした。同じ ΔX に対して F_X, F_Z はそれぞれ近接した値となっている。また成形結果でも製品肉厚、表面仕上がりなどについて似通った結果が得られ、力制御を行った場合も加工特性は ΔX でほぼ決定されることを確認した。

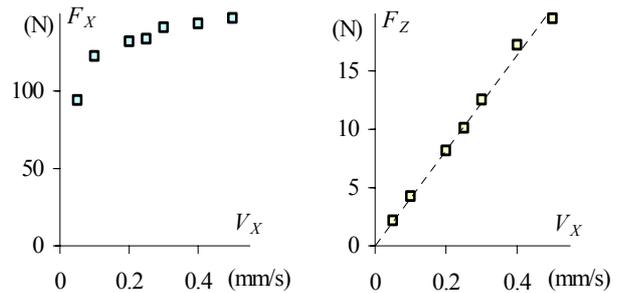


Fig. 11 Effect of V_X on Forming Force F_X, F_Z

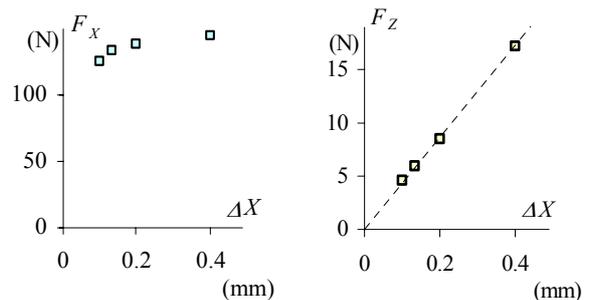


Fig. 12 Effect of ω on Forming Force F_X, F_Z

5. 考察

以上の実験結果に基づいて、位置／力ハイブリッド制御を用いたスピニング加工における加工パラメータ設定の指針について考察する。

ローラ押し付け力 F_Y が不足の場合は成形に失敗するが、ある値以上の力でローラを押し付ければ、ほぼ同程度の良好な成形結果が得られる。許容範囲の幅はかなり大きいため、比較的精度の粗い力制御も用いることができると考えられる。

ローラ送り速度 V_X 、マンドレル角速度 ω についてはそれぞれ単独ではなく、マンドレル 1 回転あたりのローラ送り量 ΔX で成形結果が決まる。 ΔX が大きすぎる場合 (V_X が大きすぎる場合 / ω が小さすぎる場合) は、所定の形状が得られず品質も低下する。一方で生産性の観点からはローラ送り速度 V_X を可能な限り大きくすることが望ましい。したがって、装置の制約の範囲で ω を最大に設定し、適切な ΔX が得られるように V_X を決定するという手順が妥当だと思われる。

成形に失敗した場合の対処としては、多くの場合、ローラ押し付け力 F_Y の増加、ローラ送り速度 V_X の減少、マンドレル角速度 ω の増加、のいずれかで解決できると考えられる。そこで前章の実験で成形に失敗したケースについて追加実験を行い、効果を確認した。

まず 4.1 節でローラ押し付け力 F_Y の不足により成形に失敗した $V_X = 0.1$ [mm/s], $\omega = 60$ [rpm], $F_Y = 300$ [N] の組み合わせについて、 ΔX を小さくするために (V_X, ω, F_Y) = (0.05, 60, 300), (0.1, 120, 300) の 2 通りで加工を試みた。いずれについても加工に成功し、良好な成形結果が得られた。次に 4.2, 4.3 節で ΔX 過大によって成形に失敗した $V_X = 0.4$ [mm/s], $\omega = 60$ [rpm], $F_Y = 400$ [N] の組み合わせについて、ローラ押し付け力 F_Y を 500 N に増加して加工を行った。 ΔX が大きい場合フィードマーク (ローラの移動による条痕) が製品表面に生じるが、成形は正常に完了した。

上記の結果より、マンドレル 1 回転あたりのローラ送り量 ΔX とローラ押し付け力 F_Y の間には相補的關係があり、 F_Y を大きくすれば ΔX も大きくとれることがわかる。ある ΔX を得るための最小の F_Y が明らかになれば、加工パラメータ設定のうえでさらに有用であると考えられる。

6. 結言

位置／力ハイブリッド制御を用いたスピニング加工に関して、良好な成形結果を得るための加工パラメータ設定の指針を見出すことを目的として、パラメータを変動させた際の加工特性の変化を実験的に調べた。

今回与えた加工パラメータの変動は比較的狭い範囲のものであるから、今後さらに範囲を広げて加工特性を調べなくてはならない。また、加工パラメータとしてはこれらの他にもローラ形状、マンドレル形状、ブランクの板厚及び材質などがある。実用的なパラメータの設定指針を確立するには、それらと加工特性との関係についても明らかにする必要があると思われる。

参考文献

- (1) 日本塑性加工学会編：スピニング加工技術，日刊工業新聞社，1984.
- (2) 小出製作所：へら絞り加工の情報発信サイト-KOIDE ウェブ，<http://www.koide-web.co.jp/index2.html>
- (3) 荒井：ロボットによるスピニング加工の研究－研究の構想と予備実験－，日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 1M31, 2002.
- (4) 荒井：ロボットによるスピニング加工の研究－力フィードバック制御を用いたしごきスピニング－，第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集，2003.

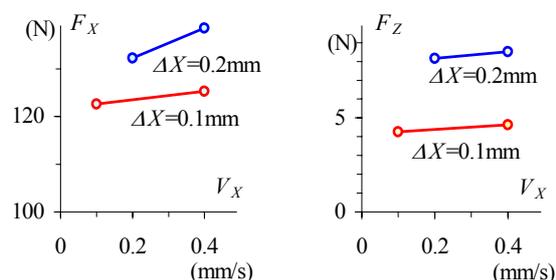


Fig. 13 Effect of ΔX on Forming Force F_X, F_Z