

ロボットによるスピニング加工の研究

—カフィードバック制御を用いたしごきスピニング—

荒井裕彦*

Robotic Metal Spinning — Shear Spinning Using Force Feedback Control —

Hirohiko Arai*

Metal spinning is a plastic 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. An experimental setup was developed for gathering basic data on the forming process. Some results of preliminary experiments are presented. The influence of the clearance between the roller and mandrel is also discussed. The author proposes applying hybrid position/force control for shear spinning, which is free from fine adjustment of the clearance. The effectiveness of the proposed method was experimentally verified.

Key Words: Metal Spinning, Plastic Forming, Industrial Robot, Force Control, Hybrid Position/Force Control

1. はじめに

本研究では、金属の塑性加工法の一つであるスピニング加工にカフィードバック制御等のロボット制御技術の適用を試みる。それにより加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかり、ロボット制御技術の新たな応用分野開拓を目指す。ここでは研究の背景と目的について述べ、基礎加工データ収集のために試作した実験装置とそれを用いた予備実験の結果を紹介する。またローラとマンドレルの間の隙間の影響について論じる。隙間の微調整が不要な、位置/力ハイブリッド制御を用いたしごきスピニングを提案し、加工実験により効果を確認する。

1.1 スピニング加工

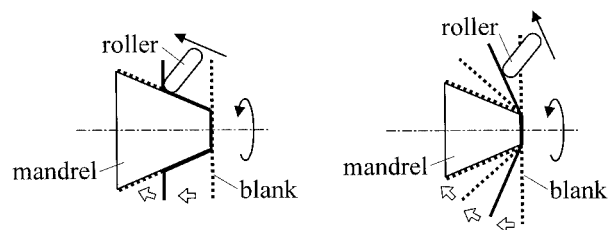
スピニング加工 [1][2] とは、回転する成形型（マンドレル）に板状や管状の素材（ブランク）を加工ローラやへらで押し付けて成形する塑性加工の一手法である（Fig. 1）。大別すると、(a) のようにローラをマンドレル側面に沿ってブランクをしごくように送り、1 パスで成形を行うしごきスピニングと、(b) のようにローラを複数のパスに従って送り、ブランクを段階的に変形する絞りスピニングの二つの方法がある。金属を材料とするシェル状の製品の成形加工法として、家庭用容器、装飾工芸品、照明器具、通信機材（パラボラアンテナ等）、ボイラ、タン

ク、ノズル、エンジン部品、タイヤホイール等の部品・製品の製造に広く用いられている。

スピニング加工を行う機械をスピニングマシンと呼び、NC 制御装置によって加工ローラを位置制御するものが現在の主流である。一般には、作業者がジョイスティックによりローラを操作して実際に成形を行い、その際に記憶した軌道を再生してそれ以降の成形を行う教示再生方式が採用されるが、計算機上で加工ローラ軌道の NC プログラムを作成する CNC 方式の機能を持つものもある [3]。また、この加工法は熟練作業による高度なものづくりの技能としても近年注目され [4]、機械による加工のほかに人力の手作業による加工（へら絞り）が今でも行われている。例えば H-II ロケットの先端カバーがこうした手作業によって製作されたことは広く知られている。

スピニング加工の特長として、次のような点が挙げられる。

A. プレス成形と比べ複雑な形状の製品が成形可能。



(a) Shear spinning

(b) Conventional spinning

Fig. 1 Metal spinning

原稿受付 2003 年 7 月 28 日

*産業技術総合研究所 知能システム研究部門

*Intelligent Systems Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

- B. 成形型が1個のみのため加工の準備が容易.
- C. 加工力が小さいため設備がコンパクト.
- D. 切削加工等の除去加工と比べ材料が節減できる.
- E. 加工精度が高く、製品の表面性状も良好.

すなわち、ラピッドプロトタイピング (B.) やネットシェイブ (D.) といった加工技術における最近の動向と合致する。また、塑性加工において近年注目を集めている逐次成形法 (インクリメンタルフォーミング) [5] の一種として位置づけることもできる。

しかし、その自動化に関しては塑性加工分野の中でも遅れが目立つといわれる。スピニングマシンは大量生産品や手作業で絞れない肉厚の製品の成形において有用だが、その教示作業は現在でも熟練作業者の技能に強く依存する。その研究についても他の加工法と比較してかなり停滞しており、国内外ともに大学・研究機関では研究者層が薄い。これは変形機構が三次元的で非常に複雑なため計算機シミュレーションで扱にくいこと、制御パラメータが多く機器開発を要することなどが原因と思われる。したがって変形原理も未解明の点が多く、特に絞りスピニングでは加工手順も理論的には確立していない。そのため実際の加工では熟練作業者の経験に頼っているのが実状である。

スピニング加工に関する代表的な研究としては次のようなものが見られる。まず、葉山ら [6] は絞りスピニングにおいて、それまでの機械式テンプレートによる加工ローラの経路を数値制御に置き換え、種々の加工条件を実験的に求めた。川井ら [7] は過去の加工事例に基づくデータベースを構築し、それをもとに加工条件や工程を選定することを提案した。島ら [8] は二つの加工ローラでワークを挟むことによりマンドレルを用いないスピニング加工法について研究を行った。海外では Quigley ら [9], Klimmek ら [10] がスピニングによる成形過程の有限要素法解析を試みている。また Katupitiya ら [11] は熟練作業者の技能を自動機による加工プロセスに取り入れるためのシステムを提案した。

1.2 ロボットと製造業

一方で、ロボット研究分野においては、大学・研究機関の研究員の非製造業分野への進出志向により、製造業における産業応用の研究には一種の空洞化が生じているという現状がある。そのために産業用ロボットの用途はハンドリング・組立・溶接・塗装など旧来のレパートリーからそれほど広がっていない。こうした用途にのみ目が向けられるために、産業用ロボットは既に成熟した古い技術であるとの見方さえある。

現在の産業用ロボットは、主に熟練を要しないライン作業者の代替に相当する、付加価値の低い単純繰り返し作業に用いられ、高速化による量産能力と低価格化によりようやく採算性を維持している。しかし、製造業における別の生産形態として、経験を積んだ熟練作業者にしかできない、少量でも付加価値が非常に高いものづくりが様々な現場で行われている [4]。こうした分野に、もっぱらアカデミックなロボット研究として蓄積された感覚フィードバック制御等の技術を活用して進出し、高機能のロボットでも採算の取れる高付加価値の応用作業を実現することができれば、ロボット技術の新たなマーケットが大きく開ける可能性がある。

1.3 本研究の目的

ロボット工学においてはロボットアームの力制御が長年にわたり研究され、位置/力ハイブリッド制御・インピーダンス制御等に関する多くの理論的・技術的な蓄積を有する。しかし、ロボット研究者の製造業離れとも相まって、実用化されているのは組立・研削などわずかな種類の作業にすぎず、付加価値性の高い有効な応用についてはいまだに模索の状態にある。

手作業によるスピニング加工では作業者の感覚、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といわれている [4]。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のはるかに小さい。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分かるように、多品種少量生産かつ高付加価値の加工法であり、力制御ロボットの採算性は高いと予想される。

そこで、本研究ではスピニング加工に力制御等のロボット制御技術を導入することにより、加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかる。具体的には加工状態のフィードバックに基づき実時間で加工条件を調整することにより、欠陥の発生を未然に防ぎ、熟練作業者に匹敵する高品質の製品の成形を目指す。またロボット特有の多自由度性を活用して、従来の自動機では実現できなかった複雑な形状の製品の成形を試みる。従来のロボットの作業が「ものを運ぶ」ことを主体としているのに対し、本研究では「ものを変形する」という新たな要素が要求される。したがって、これまでのロボット技術の蓄積を利用しつつも、挑戦的な研究課題の展開が期待できる。

2. 実験装置の試作

スピニング加工の基礎実験を行うため、実験装置を試作した。種々の材質・パラメータの下で成形加工を行い、成形の可否、製品形状・肉厚分布、表面性状、加工力等の加工データを収集することを目的とする。特にしわ・破断等の欠陥発生前後の挙動を記録し正常加工時のデータと比較する。

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。x 軸, y 軸の直動送りにはそれぞれ DC サーボモータ (60 [W]) によりボールねじ (ピッチ 2 [mm]) を駆動している。成形型の回転軸 (θ 軸) は DC サーボモータ (120 [W]) を遊星歯車減速機 (減速比 1/10) により減速している。 θ 軸は x 軸に対し $\pi/3$ [rad] 傾けて取り付けられている。いずれの軸も角度検出にはロータリエンコーダ (1,000 [p/r]) を用い、カウンタで 4 通倍している。各軸の仕様を Table 1 に

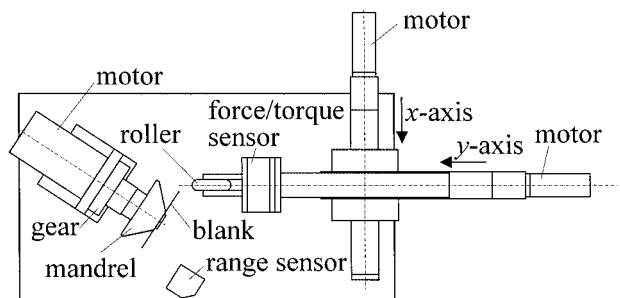


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Specifications of each axis

	x, y axis	θ axis
Rated Force/Torque	580 N	3.9 Nm
Rated Speed	100 mm/s	250 rpm
Resolution	0.5 μm	0.009 deg

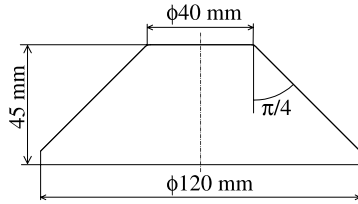


Fig. 3 Mandrel

示す。

加工ローラは直径 70 [mm], ローラ丸み半径 9.5 [mm], 材質は工具鋼 (SKD11, 焼き入れ) である。ローラと y 軸の間に 6 軸力センサを装着する。マンドレルの形状を Fig. 3 に示す。材質はステンレス鋼 (SUS304) を用いた。また、レーザ式距離センサによりワークに発生するしわを測定する。測定範囲は 80 [mm], 分解能は 0.18 [mm] である。

エンコーダ, 力センサ, 距離センサの信号は I/O ボードを介してパーソナルコンピュータ (CPU: Pentium, 233 [MHz]) に取り込み, D/A ボードからサーボドライバに電流指令を送る。制御のサンプリング周期は 1 [ms] である。

3. 予備実験

上記の実験装置を用いて, 加工データを収集する予備実験を行った。加工方法としては, しごきスピニング (Fig. 1 (a)) を試みた。ブランクは直径 120 [mm], 厚さ 0.78 [mm] のアルミニウム円板 (A1100-O 材) である。

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は

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

となることが知られている [1] [2]。この場合, $t_0 = 0.78$ [mm], $\alpha = \pi/4$ [rad] であるから $t = 0.55$ [mm] となる。そこで, マンドレルとローラの間隙は 0.55 [mm] とした。加工面の潤滑のために噴霧式潤滑剤 CRC5-56 を塗布した。

各軸の制御則として単純な高ゲインの PD 制御を用いた。 x 軸, y 軸についてはローラがマンドレル側面と平行な直線上を一定速度で移動するように制御した。また θ 軸についてもマンドレルを一定角速度で回転させた。加工中の各軸変位, モータ電流指令値, 力センサ信号, 距離センサ信号を記録した。

Fig. 4 に加工の様子を示す。また Fig. 5 はブランクとその加工結果の一例である。マンドレル形状に沿った成形が行われている。

次に, 加工の際にローラが素材に加える加工力を計測した。マンドレル側面に沿ったローラ送り方向の力の成分を F_X , マンドレル側面に対する法線方向の成分を F_Y , マンドレル回転円周の接線

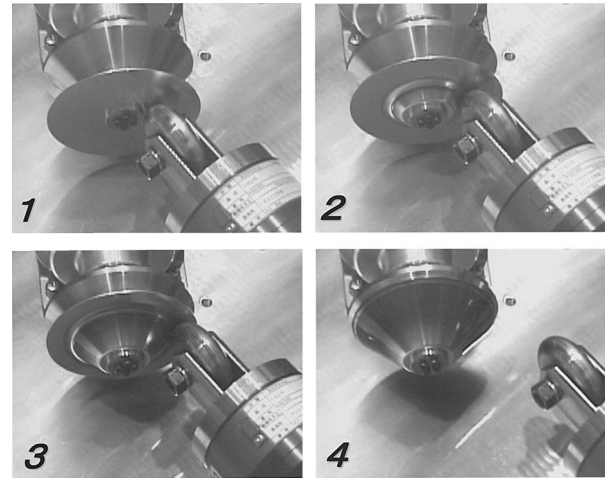


Fig. 4 Forming experiment

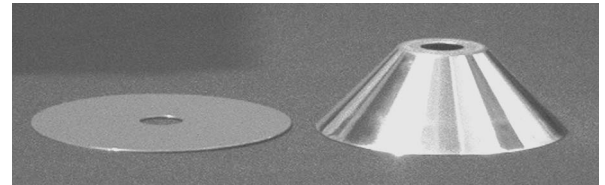


Fig. 5 Blank and product

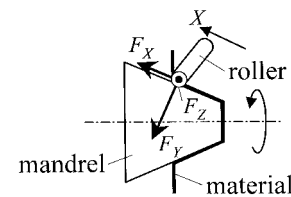


Fig. 6 Force components at roller

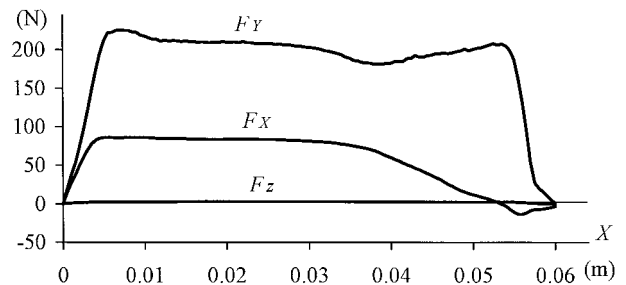


Fig. 7 Forming force

方向の成分を F_Z と定義する (Fig. 6)。横軸をローラの送り変位 X としたときの F_X, F_Y, F_Z の変化を Fig. 7 に示す。 X 方向の送り速度は 0.1 [mm/s], θ 軸の角速度は 120 [rpm] (4π [rad/s]) である。マンドレル 1 回転当たりの送り量は 0.05 [mm/rev] となる。

F_Y は素材をマンドレルに押し付ける力であり, 200 [N] 前後でほぼ一定である。ローラの送り力 F_X は, 加工前半は 90 [N] 程度で一定だが, 後半は成形が進むに従って次第に減少する。これはフランジ (素材のうち未加工の平板部分) の幅が狭くなっていくため, フランジの剛性が低くなり抵抗力が減少するため

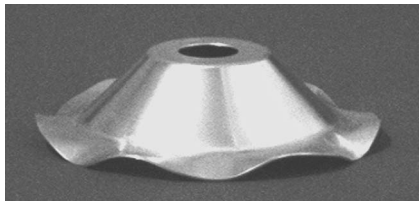


Fig. 8 Wrinkled flange

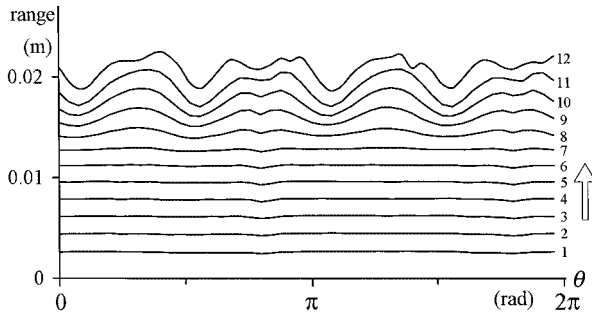


Fig. 9 Growth of wrinkle

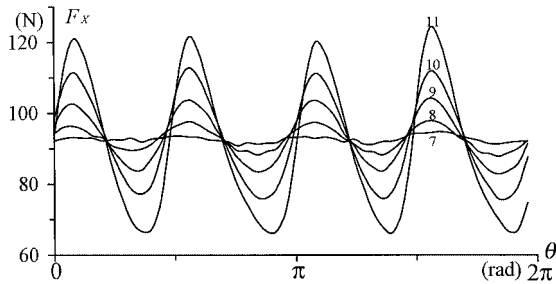


Fig. 10 Fluctuation of forming force

と思われる。加工円周の接線方向の力 F_Z は F_X, F_Y と比べて極めて小さく、最大で 3 [N] 程度だった。いずれの方向の力も一般の産業用ロボットを用いて加えることができる程度の強さである。また、モータ電流は定格値と比べてかなり小さく、トルクには十分に余裕があることも確認した。

加工ローラの送り速度を上げていくとフランジが屈屈してしわが発生する。しわが生ずると成形が不均一になり品質が低下する。また、しわが深い場合はローラの進行が妨げられ成形自体が不可能になる。Fig. 8 にしわが発生した加工結果の一例を示す。

レーザ式距離センサを用いてしわの発生状況を調べた。フランジ外周から約 5 [mm] の点の凹凸を距離センサで計測したものを Fig. 9 に示す。このときの X 方向の加工ローラ送り速度は 0.1 [mm/s]、 θ 軸角速度は 60 [rpm] (2π [rad/s]) である。1 回転当たりの送り量は 0.1 [mm/rev] となる。マンドレルが 25 回転するごとに 1 回転分のフランジ凹凸（ブランク取付面からの距離）を計測し、 θ 軸の角度を横軸としてプロットした。

加工の初期 (No.1~6) は、フランジがほぼ平板の状態成形が進んでいる。後半 (No.7~12) では、浅かったしわが次第に成長して深くなっていく様子が分かる。フランジ幅が狭くなり、剛性が不足して平面を保つことが難しくなるためと思われる。

しわが発生しているときの加工力の変化を調べた。Fig. 10 は

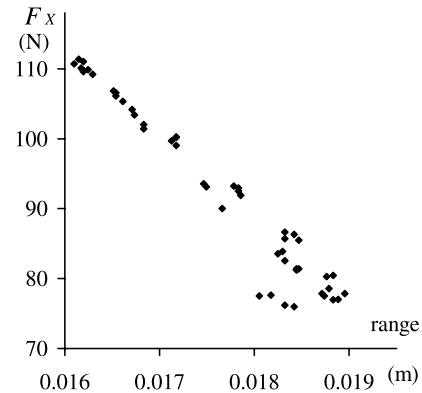


Fig. 11 Wrinkle and forming force

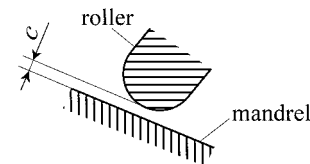


Fig. 12 Clearance between mandrel and roller

No.7~11 のデータについてローラの送り力 F_X を示したものである。しわが深くなるに従って加工力の変動も大きくなっている。No.10 のデータについて、フランジの凹凸を横軸に、加工力 F_X を縦軸にとってプロットしたものを Fig. 11 に示す。ただし距離センサは加工ローラのちょうど反対側にあるため、 θ 軸の位相は π [rad] ずらしてある。フランジの凹凸と加工力の変動の間には、ほぼ線形の関係が見られる。したがって、しわの発生やその大きさを加工力の変動からオンラインで検出できると考えられる。

4. 隙間の設定

スピニング加工における種々の加工条件のうち、加工装置の制御という観点から特に設定が難しいと思われるのは、マンドレルと加工ローラの間隙 (Fig. 12) である。しごきスピニングの場合、成形後の肉厚は式 (1) で表されるため、隙間もそれによって正確に制御する必要がある。隙間が大きすぎる場合、しわが発生しやすく、製品がマンドレルに密着しないため形状精度が劣化する。また隙間が小さすぎる場合、加工力が著しく大きくなり、材料の流れによって製品が歪む場合もある。

そのために、あらかじめマンドレルに対するローラの相対位置を精密に位置合わせしておかなくてはならない。またマンドレルの断面形状も正しく把握する必要がある。さらに、加工力が加わった状態でローラの目標経路を正確に追従しなくてはならない。装置の剛性が低い場合は、加工力によるたわみにより設定したとおりの隙間が実現できないおそれもある。

ここで扱っているマンドレル形状は単純な円錐形のため、式 (1) により成型後の肉厚が簡単に予測できる。しかしマンドレル形状がより複雑で側面の傾きが不規則に変化する場合は、肉厚分布を正確に予測することは難しい。また、1 パスのしごきスピニングではなく、素材を段階的に変形してマンドレルに沿う形状に成型する多サイクル絞りスピニングにおいては、最終

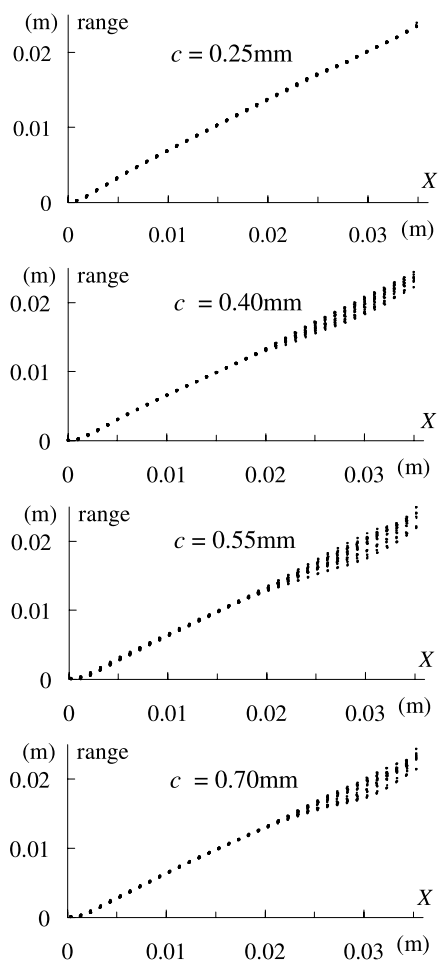


Fig. 13 Height of flange

的な肉厚分布の予測はさらに困難になる。NC機における隙間の設定は現場の作業者の経験にかなり依存し、試験的な成形を繰り返して隙間調整を行うことが多い。

隙間の設定値を幾通りか変えて加工を行い、結果を比較した。先に述べたように、式(1)による理論上の製品肉厚は $0.78 \sin \pi/4 = 0.55$ [mm] である。加工ローラ送り速度 \dot{X} 、マンドレル回転速度 θ は、しわが発生した前章の事例と同じくそれぞれ 0.1 [mm/s]、 60 [rpm] とした。隙間は 0.25 、 0.4 、 0.55 、 0.7 [mm] の4通りを試みた。

Fig. 13は、レーザ式距離センサにより計測したフランジの凹凸を示す。マンドレルが10回転するごとに1回転分のデータをプロットしてある。隙間 0.25 [mm] の場合はしわが生じることなく加工が完了している。一方、それ以外の場合は途中で凹凸の振幅が急激に増加し、しわが発生していることが分かる。

Fig. 14は加工力のうち押し付け力 F_Y を比較したものである。隙間が小さくなるほど F_Y は大きくなる。また、成形された製品の内側を調べると、隙間 0.25 [mm] の場合には全体にわたりマンドレルに押し付けられて光沢が生じている。一方、隙間 0.7 [mm] の場合には素材表面の仕上げ跡（ヘアライン）がそのまま残っている。素材がマンドレルから浮いているため、製品の精度も劣ると考えられる。

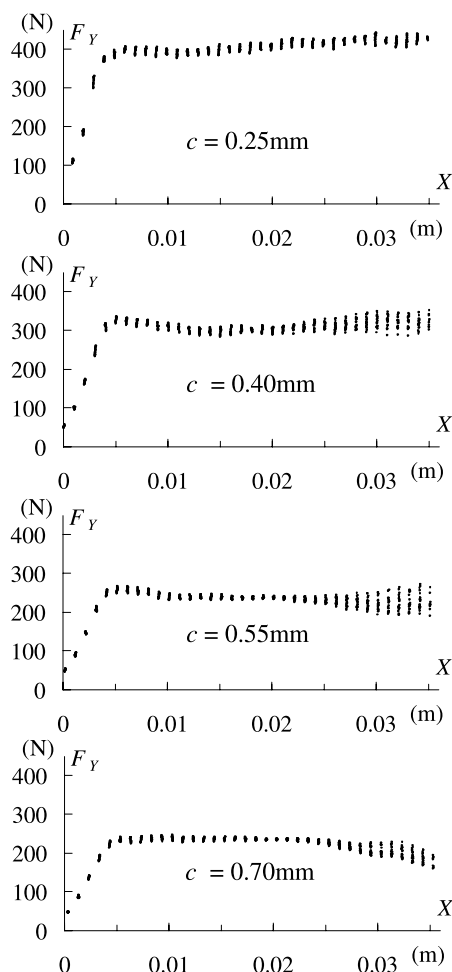
Fig. 14 Pushing force F_Y

Fig. 15はローラの送り力 F_X である。隙間が 0.4 [mm] 以上の場合には F_X が変動し、このことからしわの発生が分かる。隙間 0.25 [mm] の場合には送り力は他の場合よりも小さくなる。

なお、一つの条件について各3回ずつ加工実験を行ったが、同一の条件に対してはしわの発生の有無、しわの深さや加工力の挙動等に関してほぼ同様の加工結果が得られ、実験には再現性が認められた。

次に、高精度レーザ変位計（分解能： 0.1 [μm]）を用いてマンドレル側面から製品外側表面までの距離を測定し、成形された製品の外形を比較した（Fig. 16）。周縁部付近ではスプリングバック（弾性による成形後の戻り）により素材がマンドレルから浮いていることが分かる。隙間の設定値が小さくなるほどスプリングバックは小さくなり、 0.25 [mm] のときに最も高い形状精度が得られていることが裏付けられた。この場合、製品肉厚を考慮すると素材とマンドレルの間隔は約 0.15 [mm] 以内に抑えられている。

以上の結果を見ると、隙間が過小となるはずの 0.25 [mm] の場合に最も良好な結果が得られている。そこで、成形された製品の肉厚分布を接触式変位計（分解能： 2 [μm]）で実測してみた（Fig. 17）。図中の細線は式(1)による肉厚の理論値を示す。

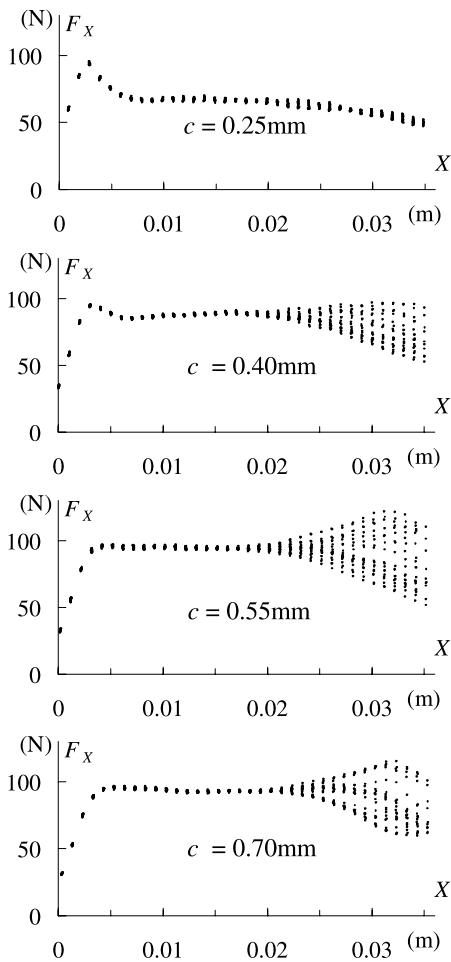


Fig. 15 Feeding force F_X

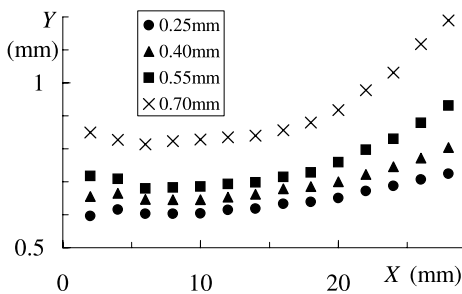


Fig. 16 Shape of products

隙間 0.25 [mm] の場合、製品の肉厚は約 0.55 [mm] でほぼ理論値通りの値となる。すなわち、設定が 0.25 [mm] の場合についても、実際にはその通りの隙間が実現されているわけではなく、加工力による装置のたわみのためむしろ理論値に近い適切な隙間が得られていると推測される。この場合サーボ偏差による経路ずれは最大で 0.04 [mm] 程度に相当し、装置の機械的変形の寄与が大きい。逆に隙間設定が理論値に最も近い 0.55 [mm] の場合は実際の製品肉厚は理論値よりも厚く、特に成形の後半では周縁に近づくに従って厚みを増していく。たわみにより実際の隙間が設定よりも大きくなるためにしわが発生すると考えられる。

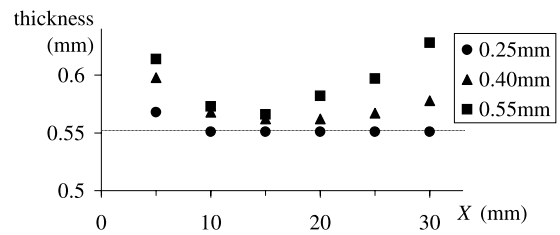


Fig. 17 Thickness of products

このように、隙間の設定値によって加工結果はかなり違ったものとなる。装置の剛性が低い場合は隙間を式 (1) の理論値より小さくすることが望ましい。しかし、どの程度小さくすればよいかは装置や加工対象に依存するため、試験的な加工が必要となる。逆に、装置の剛性が高い場合は、隙間の設定はよりクリティカルになり、マンドレルに対してローラを非常に正確に動かさなくてはならない。特に薄い板を加工する場合、適切な隙間の許容範囲が狭くなると思われる。

5. カフィードバック制御の適用

前章で述べた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の間には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と思われる。そこでカフィードバック制御の適用を試みる。

力制御の手法としては、位置と力のハイブリッド制御 [12] を用いた。マンドレル側面に平行なローラ送り方向 X に関しては位置制御により一定速 \dot{X}_d 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。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。制御則は以下のように表される。

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

$$\mathbf{f}_P = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} k_{vX}(\dot{X}_d - \dot{X}) + k_{pX}(X_d - X) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_F = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} 0 \\ F_{Yd} + k_{pF}(F_{Yd} - F_Y) + k_{iF} \int (F_{Yd} - F_Y) \end{bmatrix}$$

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。ローラは一定速で直線運動するため、加速度やコリオリ力は制御則に表れない。

この制御則を用いてスピニング加工を行った。ローラ送り速度 \dot{X} 、マンドレル回転速度 $\dot{\theta}$ は、前章と同様にそれぞれ 0.1 [mm/s]、60 [rpm] とした。ローラの押し付け力 F_{Yd} は、前章の実験で良好な結果が得られた隙間 0.25 [mm] の場合の押し付け力に基づき、400 [N] とした。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位置制御を適用し、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。

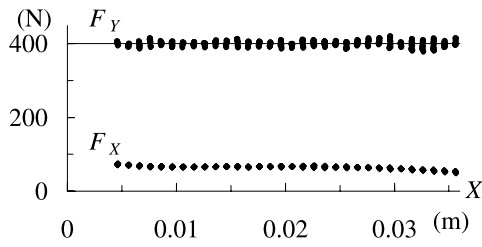


Fig. 18 Forming force

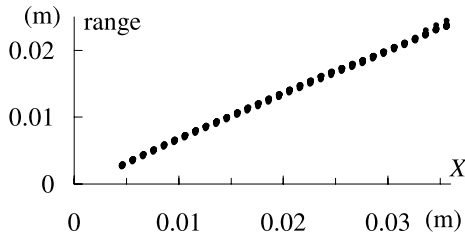


Fig. 19 Height of flange

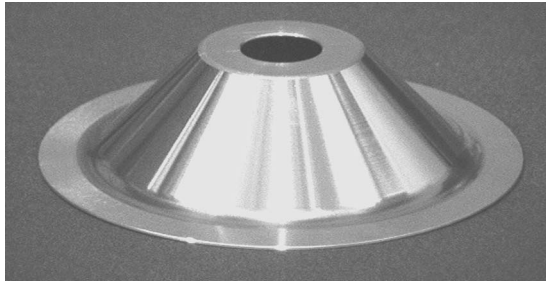


Fig. 20 Product by force control

力フィードバックゲインは $k_{pF} = 1$, $k_{iF} = 10$ と設定した。剛体同士の接触となるため, k_{pF} をこれより大きくすると振動が発生した。ただし接触点の運動が極めて低速で力が確実に伝達されるため, 低いゲインでも正確な力制御を行うことができる。なお位置制御は第3章・第4章と同様の高ゲインフィードバック ($k_{pX} = 40000$, $k_{vX} = 400$) を行った。

Fig. 18 に加工力 F_X , F_Y の変化を示す。ローラの押し付け力 F_Y がフィードバック制御によりほぼ 400 [N] に保たれていることが分かる。また Fig. 19 にフランジの凹凸を示す。ほとんどしわが発生することなく加工が進行している。Fig. 20 に本制御則による加工結果の一例を示す。

さらに, 押し付け力の設定値を $\pm 10\%$ 変化させ, $F_{Yd} = 360$, 440 [N] としそれぞれ加工を試みた。いずれの場合もしわの発生しない良好な加工結果が得られた。三通りの力設定値について, 成形された製品の外形および肉厚分布を前章と同様にプロットしたものを Fig. 21, Fig. 22 にそれぞれ示す。Fig. 16 と Fig. 21 を比較すると, どの力設定値についても, 位置制御において形状精度が最も高かった隙間 0.25 [mm] の場合と同様の精度が得られている。また製品の肉厚は 0.55~0.56 [mm] 程度であり, ほぼ式 (1) の理論値通りになっている。

力設定値の変化にかかわらずほとんど同じ加工結果が得られていることから, 望ましい加工ローラの押し付け力はかなり広い許容範囲を持つことが分かる。これは, 素材をマンドレルに

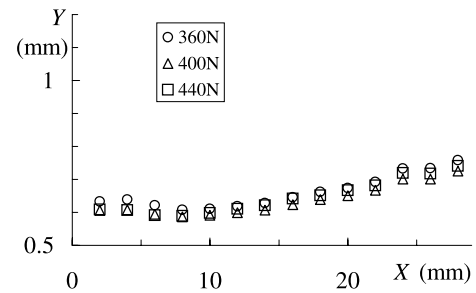


Fig. 21 Shape of products

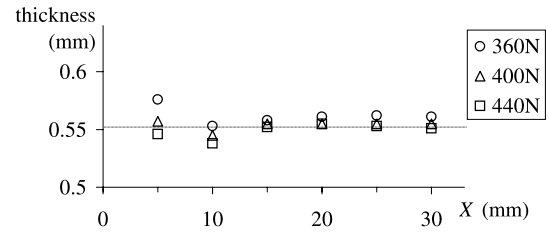


Fig. 22 Thickness of products

密着させるのに必要な押し付け力の下限と, ローラ背面で素材が潰れて材料の流れが生じ製品の歪みや破断が起こる押し付け力の上限との間には相当の幅があることを示す。したがって, 力制御もそれほど厳密なものではなく比較的精度の粗い制御手法を採用することもできると考えられ, 実用化の際に有利である。

本方式と現行のスピンニングマシンの制御方式(教示再生方式, CNC方式)を比較したものを以下にまとめる。

① マンドレルと加工ローラの間隙

CNC方式では隙間そのものを精密に設定することが必要である。教示再生方式では教示時の現物合わせとなるため設定の手間は少なくなるが, 適正な隙間が得られるかどうかは作業者の技能に依存する。本方式では加工ローラの押し付け力設定により間接的に隙間が得られ, 押し付け力設定値の許容幅も広い。

② マンドレルと加工ローラの位置設定

CNC方式ではマンドレルと加工ローラの相対位置をNCプログラムと正確に対応させる必要がある。教示再生方式は①と同様に現物合わせである。本方式では位置設定の多少のずれは力制御によって吸収される。

③ 作業者の技能への依存性

教示再生方式では作業者の技量によって製品の品質や生産効率が大幅に変わる。CNC方式ではプログラミングは自動/半自動だが, マンドレルとローラの位置合わせや隙間調整の操作において現場作業者の技能が要求される。本方式では装置を操作する上での技能に対する依存性は低い。

④ 精度の要求

CNC方式, 教示再生方式ともに加工ローラを位置制御するため, 高い位置精度が要求される。剛性の高い装置が必要であり, マンドレル回転軸の芯ぶれなども小さく抑えなくてはならない。本方式では制御および装置に対する精度の要求は低くなる。

6. おわりに

ロボット制御技術を利用したスピンニング加工に関して, 研究

の背景と目的を述べ、実験装置と予備実験の結果を紹介した。また、マンドレルとローラの隙間の設定について考察し、位置/力ハイブリッド制御を用いたスピニング加工の有用性を実験により確認した。

力制御を用いることにより、マンドレルと加工ローラの隙間を設定することなくスピニング加工が行える。微小な隙間の設定は比較的ラフな押し付け力の設定に置き換えられる。ローラとマンドレルの厳密な位置合わせは不要であり、装置の剛性にかかわらず同じ押し付け力の設定値を用いることができる。また本手法はしごきスピニングだけでなく、多サイクル絞りスピニングの最終段階でマンドレルに素材を密着させる場合にも有効と考えられる。

位置/力ハイブリッド制御を用いた加工に関する今後の課題としては、ローラ送り速度、マンドレル角速度、ローラ押し付け力、ローラ形状、マンドレル形状、ブランクの板厚および材質など、種々の加工条件とそれによる加工特性の関係を明らかにし、効率的な加工と良好な成形結果を両立させる加工パラメータの設定指針を確立することが必要である [13]。

参 考 文 献

- [1] 日本塑性加工学会編：回転加工—転造とスピニング—。コロナ社，1990。
- [2] 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。
- [3] 高田：“日本における最新回転成形技術”，塑性と加工，vol.43，no.502，pp.8-12，2002。
- [4] 小関：NHK 人間講座 ものづくりの時代～町工場の挑戦。日本放送出版協会，2001。
- [5] 井関ほか：“21 世紀のインクリメンタルフォーミング”，塑性と加工，vol.42，no.489，pp.984-990，2001。

- [6] 葉山，中村，渡辺，浜野：“数値制御スピニング機械によるロールバースプログラミング”，塑性と加工，vol.27，no.308，pp.1053-1059，1986。
- [7] 川井，澤野，伊藤：“スピニングデータベースの試作”，塑性と加工，vol.30，no.345，pp.1411-1415，1989。
- [8] 島，小寺，村上：“フレキシブルスピニング加工法の開発”，塑性と加工，vol.38，no.440，pp.814-818，1997。
- [9] E. Quigley and J. Monaghan: “Enhanced Finite Element Models of Metal Spinning,” J. of Materials Processing Tech., vol.121, no.1, pp.43-39, 2002.
- [10] Ch. Klimek et al.: “Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming by Spinning,” 塑性と加工，vol.44，no.507，pp.54-56，2003。
- [11] J. Katupitiya, M.W. Yiu and D. Springford: “Automation of Metal Spinning Machines Using CNC Controllers and Human Skill Integration,” Proc. The 4th Int. Conf. on Motion and Vibration Control (MOVIC'98), Zurich, Switzerland, 1998.
- [12] 吉川：ロボット制御基礎論。コロナ社，1988。
- [13] 荒井：“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—”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 予稿集 CD-ROM，2A1-1F-E3，2003。



荒井裕彦 (Hirohiko Arai)

1959年7月9日生。1982年東京大学工学部計数工学科卒業。同年本田技研工業(株)勤務。1984年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所に改組，現在知能システム研究部門主任研究員。工学博士。マンピュレータの制御，非ホロノミック系，パワーアシスト等の研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，IEEEの会員。2001～2002年度日本ロボット学会理事。2003年よりIEEE Trans. Robotics and AutomationのEditor。(日本ロボット学会正会員)