

リニアモータを用いた力制御スピニング加工機

○荒井裕彦 (産業技術総合研究所)

Force-controlled Metal Spinning Machine Using Linear Motors

*Hirohiko ARAI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract —Metal spinning is a plastic forming process that forms a metal sheet by forcing the metal onto a rotating mandrel using a roller tool. A novel metal spinning machine was designed in which the roller is directly driven by linear motors. We aim to form non-axisymmetric products by controlling the pushing force of the roller so that the roller can quickly track the changing radius of the mandrel. Our experimental results show that the linear motors substantially improve response of the force control and non-axisymmetric products can be rapidly formed. Open-loop force control without a force sensor was also studied. It exhibited a comparable performance to closed-loop control with regard to the forming time.

Key Words: Metal spinning, Plastic forming, Linear motor, Force control, Impedance 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)に金属板の素材(ブランク)を加工ローラで押し付けて成形する塑性加工の一手法である(Fig. 1)。金属を材料とするシェル状の製品の成形加工法として、身近な照明器具や調理器具等から、航空宇宙・半導体製造・原子力等の先端産業で用いられる部品の製造まで、広く利用されている。成形型を1個しか必要としないため、プレス加工と比べて型のコストが非常に低く、特に多品種少量生産や製品試作に適している。

スピニング加工ではマンドレルおよびワークを回転させながら成形加工を行うため、成形の対象は、通常、回転軸に直交する断面が円形の、軸対称形状に限定される。一方で、楕円形、多角形、偏心など非軸対称形状の製品が成形できるようになれば、スピニング加工の用途はさらに広がると考えられる。

著者は、位置/力ハイブリッド制御を用いて、加工ローラを軸方向に送りながら押し付け力を制御し、ローラをマンドレル形状に倣わせることにより非軸対称形状の製品を成形する方法を提案した[3]。この方法を用いてアルミニウム薄板を非軸対称形状に成形することにも成功したが、マンドレル回転数が上げにくく加工時間が長くなるという問題点が見られた。

そこで、力制御の応答性を改善し加工時間の大幅な短縮をはかることを目的として、リニアモータを用いて加工ローラを駆動する力制御スピニング加

工機を開発した。本報では試作したスピニング加工機の仕様および評価実験の結果について報告する。

2. 力制御による非軸対称形状の成形

文献[3]では非軸対称形状の成形のために位置/力ハイブリッド制御を用いた。すなわち、非軸対称形状のマンドレルを用い、加工ローラの押し付け力を制御して、素材を適切な力でマンドレルに押し付ける。一方、マンドレル回転軸と平行な方向のローラ送りに関しては、位置制御により一定速で加工ローラを移動させる。マンドレル形状に倣ってローラを動かすことにより、素材をマンドレルに密着させ、目標とする非軸対称形状の製品を成形する。

本手法によれば、特殊な専用メカニズムを用いなくても非軸対称形状の成形を行うことができ、マンドレルの交換のみで様々な形状に対応可能である。また実物のマンドレルを形状の基準としているため、膨大な3次元形状データを制御に使うことなく成形が可能であるという利点がある。

こうした力制御による非軸対称形状の成形において、加工時間の短縮は最も重要な課題の一つである。加工時間は(製品高さ)÷(マンドレル一回転当たりの加工ローラ送りピッチ)÷(単位時間のマンドレル回転数)で表される。非軸対称形状の成形では軸対称の場合よりもマンドレル回転数をかなり低くする必要があり、それが加工時間増加の原因となる。実際、文献[3]の成形実験では1個当たり10~30min程度の加工時間がかかっており、これを大幅に短縮しなくてはならない。

非軸対称形状の成形では、加工ローラはマンドレルの断面形状に倣い、マンドレルの回転に従って前進/後退を繰り返す。しかし、回転数が過大になるとローラの運動がマンドレル断面の凹凸に追いつかなくなり、力制御による応答が振動的になって製品の表面が波打ったり、素材の押し付けが不足して製品がマンドレルから浮き上がる原因となる。

一方、加工ローラの送りピッチは、ローラの押し

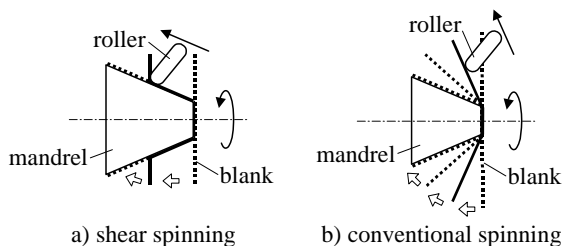


Fig. 1 Metal spinning

付け力を強くするほど大きく取ることができる [4]. しかし非軸対称形状の場合、ローラ押し付け力はマンドレルの回転を妨げるトルクの原因となる. そのため、マンドレル軸を駆動するモータのトルクによっては、ローラ押し付け力をあまり強くすることができない場合があり、結果的に送りピッチも小さくなる.

3. 高速化のための加工機開発

加工時間を短縮するために、文献[3]ではローラの動きに応じてマンドレル回転速度を調整する制御アルゴリズムを提案した. しかしこれはあくまで補助的な手段であり、上記のような問題は本質的には加工機のハードウェア設計において解決すべきである. 本章では非軸対称形状の成形を高速で行うための加工機の開発について述べる.

3.1 アクチュエータの選定

加工時間が長くなる原因はいずれも主にアクチュエータの性能不足にあると考えられる. 加工機のアクチュエータには次のような特性が要求される.

加工ローラ用アクチュエータ:

- ・十分なローラ押し付け力が発生できること.
- ・高速で駆動可能であること. また高い加速度が発生できること.
- ・高速領域においても力制御が可能なこと. また力制御の応答性が高いこと.
- ・摩擦および実効慣性が小さいこと.
- ・高いバックドライバビリティを有し、バックラッシュが小さいこと.

マンドレル用アクチュエータ:

- ・ローラ押し付け力に抗してマンドレルを回転させる十分なトルクを有すること.
- ・バックラッシュが小さく、外部トルクの急激な変化に耐えること.

文献[3]の装置ではDCサーボモータとボールねじを用いて加工ローラを駆動した. また従来のスピニング加工機では、油圧シリンダが広く用いられている. それらに対し、ここでは上記の要求を考慮して、新たにリニアモータを加工ローラ用の直動アクチュエータとして採用することとする.

リニアモータは電流に比例する推力を発生し、発生した推力をボールねじのような伝達機構を介することなく直接に駆動対象へ及ぼすことができる. 伝達機構の機械的特性がループに入らないため力制御の応答性が向上できる. また加工ローラがマンドレルで急激に押し戻されても伝達機構にダメージを与える心配がない. 摺動部分を持たないため摩擦は直線ガイド機構によるもののみであり、油圧シ

リンダやボールねじ機構と比べて摩擦が小さいと期待できる. 市販の製品でも非常に高い速度・加速度を発生できるものがあり、高速の動作が可能である. したがってスピニング加工機において、加工ローラを駆動するための直動アクチュエータとしてリニアモータを用いれば、応答性の優れたローラの押し付け力制御が構成でき、非軸対称形状の成形においてマンドレル回転数を大幅に上げられると考えられる.

3.2 加工機の試作

加工ローラの駆動用として、具体的にはコア付きコイル可動形のブラシレスリニアサーボモータ (日機電装 NLA-1000NM) を採用した. このタイプのリニアモータは推力密度が高く、小さいサイズでも大推力を得ることができる. またマンドレル回転軸はACサーボモータ (安川電機 SGMAH 形) を遊星歯車で減速して駆動する. 非軸対称形状の成形においてはローラの押し付け力によってマンドレルに正逆両方向のトルクが交互に加わるため、バックラッシュの小さい (<3 分) 減速機を用いた (ハーモニックプラネタリ® HPG 形). ローラ押し付け力に抗してマンドレルを駆動できるように定格トルクには十分な余裕を持たせた. 今回試作した加工機と文献[3]で用いた実験装置のアクチュエータの性能比較を Table 1 に示す.

試作した加工機の概略図を Fig. 2 に示す. 2組のリニアサーボモータを直交して配置したテーブル

Table 1 Specification of actuators

	new machine	setup of Ref.[3]
actuator for roller	linear servo motor	servo motor + ball screw
continuous force	1000N	580N
peak speed	3.0m/s	0.17m/s
actuator for mandrel	servo motor + planetary gear	servo motor + planetary gear
continuous torque	14Nm	3.9Nm
rated speed	270rpm	250rpm

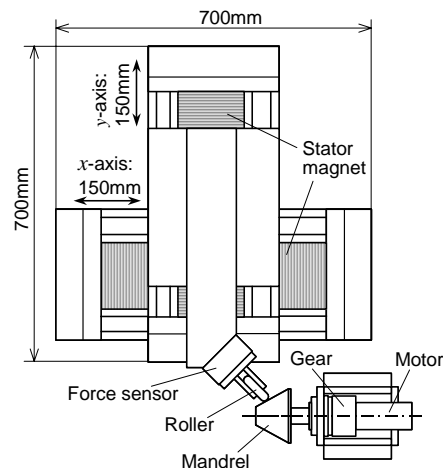


Fig. 2 Linear motor driven metal spinning machine

で加工ローラを駆動する。加工ローラは y 軸に対して 45° 傾けて取り付けられる。ローラ取付部には6軸力センサを備える。また x 軸とマンドレル回転軸 (θ 軸) は平行に配置した。非軸対称形状の成形の際にはテーブル上側の y 軸のみを力制御することにより、 y 軸モータと加工ローラだけがマンドレルに倣って半径方向に高速で往復するため、実効慣性を小さく抑えることができる。

4. 評価実験

4.1 パラメータ同定

Fig. 3 に完成した加工機の写真を示す。はじめに、各軸に一定速度入力・一定加速度入力を与え、クーロン摩擦、粘性摩擦係数、慣性を同定した。Table 2 に各パラメータをまとめる。

x , y 軸のクーロン摩擦が予想外にかなり大きな値を示している。これは固定子の永久磁石とコア付き可動子との間に約 12000N というきわめて強い吸引力が働くため、ガイド機構のリニアベアリングで大きな摩擦が発生してしまったためである。この点ではモータの選定に再考の余地があると思われる。とはいうものの無負荷状態で最大推力 3000N を加えた時の加速度は 6.9G となり、マンドレルの凹凸への追従能力は十分と考えられる。

4.2 制御則とその評価

スピニング加工にはさまざまな手法があるが、そのうちで成形型側面に沿って板をしごくように工具を送り、1パスで成形を行うしごきスピニング (Fig. 1 a) を考える。この加工において、マンドレル回転軸と平行な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。一方、ローラ押し付け力については、マ

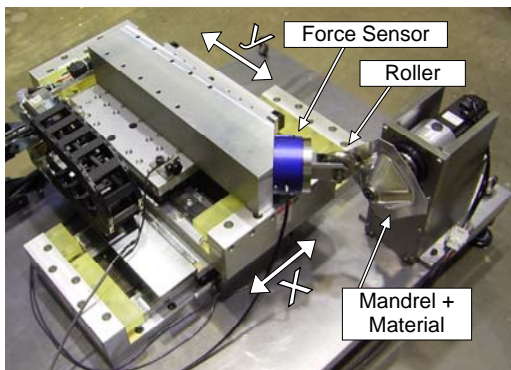


Fig. 3 Photo of linear motor driven metal spinning machine

Table 2 Dynamics parameters of each axis

	x -axis	y -axis	θ -axis
coulomb friction	100N	97N	1.0Nm
viscous friction	153Ns/m	153Ns/m	0.07Nms/rad
inertia	116kg	43kg	0.013kgm ²

ンドレル側面に対する法線方向の成分 F_n が一定値 F_{nd} となるように、回転軸と直交する成分 F_y を制御する (Fig. 4)。こうすることで、ローラが非軸対称形状のマンドレルに倣って動いても、ローラの軌跡はフランジ (素材のうち未加工の外周部分) と同一の平面上に保たれ、フランジのしわを防ぐことができる。

本機ではマンドレル回転軸と x 軸が平行であるから、 x 軸と y 軸に独立の制御則を構成することができる。 x 軸に関しては通常の PD フィードバックによる位置制御を構成した。

$$f_x = m_x \{k_{vx}(V_{xd} - \dot{x}) + k_{px}(V_{xd}t - x)\} \quad (1)$$

f_x は x 軸モータ推力、 m_x は x 軸慣性、 k_{px} , k_{vx} はフィードバックゲインである。

y 軸に関しては仮想内部モデルによるインピーダンス制御則[5]を用いた。まずマンドレル法線方向の力が F_{nd} となるための y 方向の力 F_{yd} を求める。

$$F_{yd} = (F_{nd} - F_x \sin \alpha) / \cos \alpha \quad (2)$$

α はマンドレルの代表的な円錐半角である。 x 方向の力 F_x は力センサによる実測値を用いた。慣性 M_y , 粘性摩擦 B_y からなる仮想インピーダンスを設定し、 y 軸の目標加速度 \dot{V}_{yd} , 目標速度 V_{yd} を求める。

$$\begin{cases} \dot{V}_{yd} = (F_y - F_{yd} - B_y V_{yd}) / M_y \\ V_{yd} = \int \dot{V}_{yd} dt \end{cases} \quad (3)$$

V_{yd} , \dot{V}_{yd} を以下の速度制御則に入力すればよい。

$$f_y = m_y \{\dot{V}_{yd} + k_{vy}(V_{yd} - \dot{y})\} \quad (4)$$

f_y は y 軸モータ推力、 m_y は y 軸慣性、 k_{vy} はフィードバックゲインである。高ゲインの速度フィードバックでクーロン摩擦の影響も抑制することができる。これにより仮想インピーダンス M_y , B_y を介して目標の力 F_{yd} を加えた状態が実現できる。

この用途では、加工ローラとワークがリジッドに接触し、接触点に大きな力を加えつつ、接触点の位置が高い速度・加速度で動く、という非常に厳しい条件の下で力制御を行う必要がある。また制御に起因する発振等は品質の劣化に直結するため、力制御はどんな場合にも安定なものでなくてはならない。そのため、加工の前に実験的に力制御則の評価を行い、試行錯誤により制御パラメータを決定した。偏心した円盤状のステンレス製カム (直径 110mm,

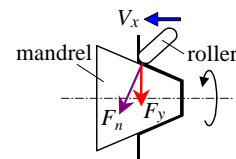


Fig. 4 Force control of roller

10mm 偏心) を, マンドレルの代わりに θ 軸に取り付け, 力制御により加工ローラを押し付けつつカムを回転させて, 加工状態を模擬した.

力制御の応答性を改善するためには, インピーダンス制御則のパラメータ M_y, B_y をなるべく小さい値とする方が望ましい. ところが慣性パラメータ M_y が実際の y 軸慣性(43kg)を下回ると発振が生じた. そこで多少余裕を持たせて $M_y=55\text{kg}$ と設定した. 一方, 粘性摩擦 B_y は, 変化させてもあまり大きな影響が現れなかったので, 実際の値とほぼ等しく, $B_y=150\text{Ns/m}$ と設定した.

4.3 成形実験

文献[3]と同じく 2 種類の非軸対称形状マンドレル (Fig. 5) を用いて, 成形実験を行った. マンドレル 1 は半角 45° の円錐台の側面 4 カ所をワイヤ放電加工により切断し, 平面としたものである. 回転軸に直交する断面は円弧と直線で構成される. またマンドレル 2 は半角 30° の円錐を 10° 傾けて頂部と底部を切断した形で, 傾斜軸かつ偏心である. マンドレル側面の回転軸に対する傾きは最大 40° , 最小 20° となる. ブランクは厚さ 1.0mm 直径 150mm のアルミニウム円板 (A1100P-H24) である. 加工ローラは直径 70mm, 丸み半径 9.5mm, 材質は工具鋼である.

Fig. 6 にマンドレル 1, マンドレル 2 を用いた成形品の写真を示す. マンドレル回転軸のモータトルクに余裕があるため, 文献[3]よりも深い成形品を作ることができた. すなわち, 半径が大きくローラ押し付け力によるトルクが強くと作用する部分も, マンドレルを回転させ続けることが可能である. 従来の装置では, マンドレル 1 でローラ押し付け力が 450N を越えると, マンドレル回転軸のトルク不足により回転が停止する場合があった. しかし本機では, ローラ押し付け力 850N を加えた状態でも, マンドレル回転軸のトルク指令は, 最大トルクの 35%未満であり, 十分に余裕が見られる.

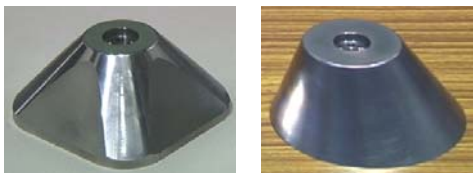


Fig. 5 Mandrels (#1: left, #2: right)

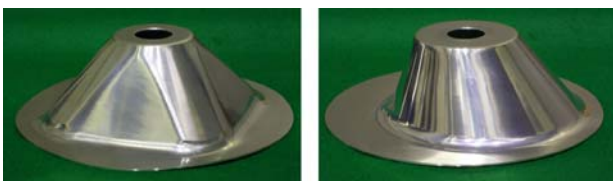


Fig. 6 Non-axisymmetric products (#1: left, #2: right)

Fig. 7 にレーザ変位計で測定した成形品表面の断面形状を示す. マンドレルに沿って非軸対称形状に成形されている. 成形品表面とマンドレル表面との距離は, マンドレル 1 で 0.88mm 未満, マンドレル 2 で 1.27mm 未満だった. 成形品の肉厚を考慮すると, スプリングバックは比較的小さく, 成形品はマンドレルに十分密着していると言える.

マンドレル 2 について, ローラ押し付け力目標値 F_{nd} とマンドレル回転数を変化させて成形を行い, 成形の可否を調べた (Fig. 8). マンドレル一回転当たりのローラの回転軸方向送りピッチは一定値 (0.4mm/rev) とした. 図中で○印は成形に成功した場合を表す. △印では成形品の底部付近がマンドレルから浮き上がり形状が歪む. ×印では加工ローラがワークを介してマンドレルと衝突し, プログラムが過大な加工力を検出して成形を中断する. 押し付け力を強めるほどマンドレル回転数を上げることができるといった傾向が見られる.

押し付け力目標値 F_{nd} を 1000N としたときの押し付け力 F_n の測定値を, マンドレル回転数 240rpm, 180rpm について示す (Fig. 9). 加工ローラは激しく往復運動するため, 実際の押し付け力 F_n は慣性力の影響でかなり変動する. 変動の振幅はマンドレル回転数が上がるほど大きくなる. ただし平均値はそれぞれ 1017N, 1021N で目標値 1000N とほぼ等しく

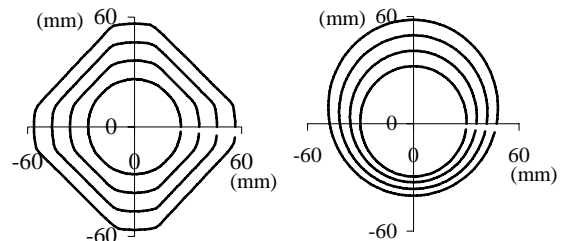


Fig. 7 Shape of products (#1: left, #2: right)

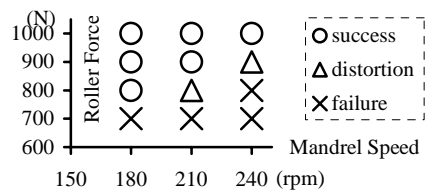


Fig. 8 Effect of pushing force vs. mandrel speed

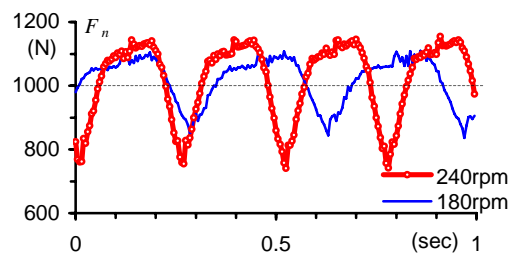


Fig. 9 Pushing force of roller

なっている。また、成形が可能なローラ押し付け力にはプラス側に広いマージンがあるため[4]、いずれも成形には成功している。

次に目標値 F_{nd} を 1000N, 800N としたときの押し付け力 F_n を Fig. 10 で比較する (マンドレル回転数: 210rpm)。成形不良となる 800N の場合は、1回転毎に F_n が不連続的にジャンプする瞬間がある。その直前には F_n が 600N 付近まで低下する部分が見られる。ここでは押し付け力の不足により、加工ローラがワークに押し戻されて、マンドレルから浮き上ると考えられる。押し付け力のピークは、いったん浮き上がったローラが再びマンドレルと接触する際に生ずる。マンドレル回転数が大きすぎたり F_{nd} が小さすぎると、浮き上がりが大きくなるために、ローラとマンドレルの接触における衝撃が強くなって、成形中断に至ると推測される。

マンドレル回転数が同じならば慣性力による F_n の振幅は等しくなるから、十分なローラ押し付け力目標値を与えれば、 F_n が変動しても加工ローラがマンドレルから浮き上がることなく、成形が可能となる。Fig. 10 では、 $F_{nd}=1000N$ とすると、押し付け力の不連続的な変化がなくなり、 F_n が連続的に推移して成形に成功している。

種々の加工条件で成形を繰り返した結果、マンドレル1では 60rpm, マンドレル2では 240rpm までは、ローラがマンドレルに追従し成形が可能なることを確認している。マンドレル1では、曲面部分と平面部分の境界で急激な押し付け力の変化が生ずるため、回転数を上げることが難しい。

文献[3]の実験装置の場合、マンドレル1では 15rpm, マンドレル2では 30rpm 程度が限界だったので、それぞれ4倍、8倍まで回転数を上げることができた。また、十分な押し付け力を与えることが可能なので、加工ローラの送りピッチも大きく取れる。送りピッチを 0.4mm/rev とすると、この加工速度では、高さ 30mm の成形品を 75sec (マンドレル1), 19sec (マンドレル2) で作るができる。リニアモータの採用により、非軸対称形状の加工時間の大幅な短縮を達成できたと言える。

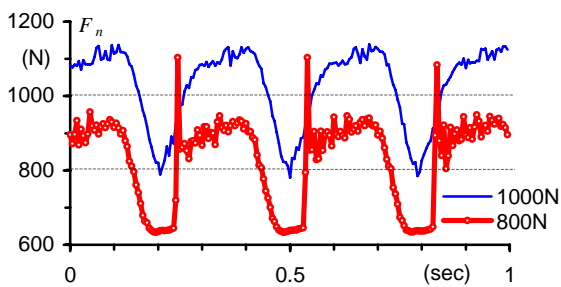


Fig. 10 Pushing force of roller

5. 開ループ力制御

ここまでは、加工ローラの押し付け力制御のために、ローラ取付部に装着した6軸力センサからのフィードバックを用いてきた。しかし実用化の観点から言えば、力センサは一般に高価であり、過負荷や衝撃により壊れやすく、信号系や制御系も複雑となる。したがって、力センサを用いずに押し付け力の制御が可能となれば非常に有用である。本機ではリニアモータを用いているため、推力が直接ローラに伝わり、開ループでもモータ電流で容易に押し付け力が制御できると考えられる。そこで本章では、力センサを用いない開ループでの力制御が非軸対称形状の成形に適用可能か検討する。

開ループ制御の場合、 x 方向、 y 方向の力成分をそれぞれ正確に検出することができないため、マンドレル法線方向の力成分 F_n を制御することは難しい (Fig. 4 参照)。代わりに y 軸モータ推力 f_y で半径方向の押し付け力 F_y を制御する。 F_y の目標値を F_{yd} とすると、

$$f_y = F_{yd} \quad (5)$$

という最も単純な制御則を適用した。一方、 x 軸に関しては(1)式と同じPDフィードバックによる位置制御を構成した。

$$f_x = m_x \{k_{vx}(V_{xd} - \dot{x}) + k_{px}(V_{xdt} - x)\}$$

F_n と F_y では方向が異なるため、目標値 F_{yd} をどのように設定したら良いか調べる必要がある。そこでこれまでの閉ループ力制御による成形実験において測定された F_n と F_y の値を比較する。マンドレル2を用いて成形に成功したケースにつき、測定された F_y の平均値を横軸に、 F_n の平均値を縦軸にとってプロットしたものを Fig. 11 に示す。加工ローラの送りピッチは 0.4mm/rev である。マンドレル回転数は 120~240rpm と広い範囲のデータが含まれているが、回転数とは関係なくプロットされた点はほぼ一直線上に並ぶ。すなわちローラの送りピッチが一定で

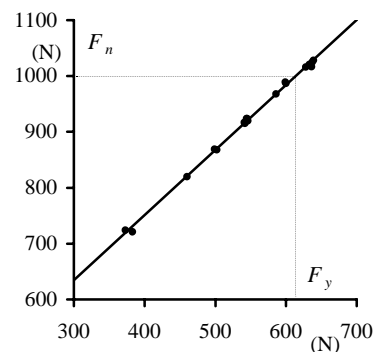


Fig. 11 Relationship between F_n and F_y

あれば、半径方向の押し付け力 F_y の平均値と法線方向の押し付け力 F_n の平均値は、線形の関係にあると見てよい。

前節の実験では、 F_n を 1000N とした場合に良好な成形結果が得られた。そのためには、Fig. 11 より F_y を 600N 程度にすればよいと推測される。そこで目標値 F_{yd} を 600N と設定して成形実験を行った。ローラ送りピッチはやはり 0.4mm/rev である。マンドレル回転数を徐々に上げながら成形を繰り返し、回転数を 240rpm まで上げてもローラがマンドレルに追従し成形できることを確認した。

マンドレル回転数が 240rpm のときの F_y の変化を Fig. 12 に示す。慣性力と摩擦力の影響により、 F_y は大きく変化している。しかし Fig. 10 ($F_{nd}=800N$) のような押し付け力の不連続的な変化は見られない。実際にローラはマンドレルから浮き上がることなく、常にワークをマンドレルに押し付けている。また F_y の平均値は 637N、 F_n の平均値は 1026N で、おおむね目標値に近い押し付け力が実現できている。

マンドレル 1 についても開ループ力制御で成形実験を行い、回転数を 60rpm まで上げられることを確かめた（押し付け力目標値 $F_{yd}=600N$ 、ローラ送りピッチ 0.4mm/rev）。すなわち、マンドレル 1・2 ともに、マンドレル回転数の限界に関して言えば、(5)式のような単純な開ループ力制御でも、力センサを用いた閉ループ力制御との性能の違いは見られなかった。

本用途では、成形が可能なローラ押し付け力の許容範囲が広く、力制御の精度はそれほど高くなくても良い。むしろ、ローラがマンドレルの速い動きに倣い、十分な押し付け力で接触を確保できることの方が重要である。また制御による発振等は絶対に防ぐ必要があり、安定な力制御則が要求されるため、閉ループ制御のパラメータ設定は保守的なものとなる。上記のような理由により、開ループでも閉ループ制御に匹敵する性能が得られたと考えられる。

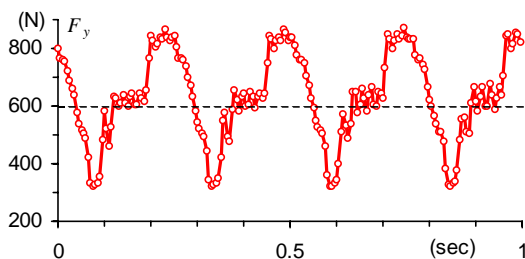


Fig. 12 Pushing force of roller

今回は非軸対称形状のみを扱ったが、軸対称形状の場合はローラの動きがきわめて低速となるため、慣性力や摩擦力の影響がほとんどなくなり、開ループと閉ループの性能差はさらに縮まるだろう。

力センサのコストや耐久性、コントローラ構成の複雑さ等、他の要素も考え合わせると、開ループ力制御の閉ループ制御に対する実用上の優位性が示されたと言える。また、力制御の応答性をさらに上げるためには、y 軸可動部の軽量化やリニアベアリングにおける摩擦力の低減等のハードウェア改良が必要であろう。

6. 結 言

スピニング加工による非軸対称形状の成形の高速化を目指して、リニアモータで加工ローラを直接駆動するスピニング加工機を新たに開発した。評価実験において、非軸対称形状のマンドレルをこれまでの装置よりはるかに速く回転させても、ローラがマンドレルに追従して成形が可能であることを確認した。また開ループ力制御による非軸対称形状の成形を試み、加工時間については閉ループ制御に匹敵する性能を示すことを確かめた。

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] 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—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 798-805, 2004.
- [3] 荒井: “ロボットによるスピニング加工の研究—力制御を用いた非軸対称製品の成形—”, 第 10 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 203-208, 2005.
- [4] 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—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 2A1-1F-E3, 2003.
- [5] 小菅, 古田, 横山: “ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 55-62, 1988.