



S. Yoshihara

スピニング加工におけるファジィモデル援用 加工プロセス制御システム

吉原 正一郎 *

1. はじめに

アルミニウム合金、マグネシウム合金の軽金属材料は近年、構造部材への積極的適用の観点から高強度化が目指され、その需要は増大している。特にマグネシウム合金は、医療系への適用も検討されるなど、機械的性質だけでなく化学的性質・特徴などを含め各方面から研究されている¹⁾。このような軽金属材料は中空部材としてのニーズも高い。その加工方法には回転加工、プレス曲げ等による加工などが挙げられる。

マグネシウム合金の構造部材の利用・ニーズは、輸送機器では自動車の温室効果ガス排出削減の背景より、燃料に水素を搭載した燃料電池車の適用が候補として挙げられる。現在、水素を貯蔵する圧力容器の材料には主にアルミニウム合金管が使用されているが、今後、更なる軽量化が要求されるため、マグネシウム合金の圧力容器への適用が期待されている。そこで、マグネシウム合金管を用いて圧力容器を製造する場合、管端末部においてスピニング加工の適用の可否と、任意目的形状への加工の達成を目的とした。

回転加工の一つであるスピニング加工は、逐次成形であり、プレス加工などと比べて専用の金型を必要としないため、加工の自由度が高く、熟練技術者の“勘”と“技”に依存するところが大である。そこで、スピニング加工の研究では加工原理、加工法や加工条件が成形に及ぼす影響が調査されている。すなわち、加工プロセスが重要であり、この適正化さらには最適化を図るために知能化技術を援用する手法が研究されている²⁾。このように、経験を必要としない知能化技術を援用した加工工程設計方法が達成できれば、喫緊の課題である熟練技術者の減少にも多少役立てられると考える。

知能化技術はロボット分野、電気分野や機械加工分野など多岐にわたって適用されている。機械加工分野において、工程数削減や製品の寸法精度向上などを目的とし、工作機械あるいは加工法のインテリジェント化に関する研究³⁾が行われており、実用化も盛んである。その手法は、数値制御、ニューラルネットワーク、ファジィ理論、画像化処理技術、データベースの構築など様々である。それら知能化技術の適用により、加工精度改善、成形性向上や加工工

程設計の簡易化が報告されている^{3,4)}。これらの特徴を活かしてスピニング加工に適用する研究を実施した。具体的にはファジィモデルを適用したスピニング加工の有限要素シミュレーションにより、工具押込み量の制御により加工時間の短縮が可能であることが確認されている⁵⁾。しかしながら、加工工程が製品精度、目的形状および肉厚分布にどのような影響を及ぼすか明らかにされていない。実際に燃料電池のような圧力容器を製造する場合、加工工程とこれらの評価項目との関係を明らかにし、最良の加工プロセスを探索する必要がある。

そこで、マグネシウム合金管端末部のスピニング加工において、製品精度向上のために工具経路を制御するシステムの開発を目的とした。具体的には、被加工材形状を計測できる画像計測を適用して製品精度を評価し、ファジィを援用して工具経路を探索するシステムを提案し、その有効性を調査した。また、アルミニウム合金を用いて加工プロセスによる肉厚分布への影響についても調査した。

2. 旋盤を改良したスピニング加工機

図1に開発したスピニング加工機の写真を示す。開発したスピニング加工機において被加工材の回転装置は卓上旋盤をベースに製作した。主となるスピニング加工機は、AC サーボモータ、アクチュエータ、リニアガイドおよびPCで構成した。表1にスピニング加工機の性能を示す。加工治具であるローラ工具のX軸方向の最大許容荷重は1150[N]、Y軸方向の最大許容荷重は1380[N]であり、送り速度 0.01~10[mm/rev]、被加工材回転速度 340~1200[rpm]である。ローラ工具の材質はSKD 焼入れ材を使用した。ローラ工具の形状は直径 $D_R=24$ [mm]、先端丸み半径 $\rho_R=2$ [mm]である。ローラ工具の取り付け角度は、被加工材中心軸に対して 45° に設定した。なお、本研究では、製品形状を測定するために、オンラインで、画像処理できるよう CCD カメラを使用して、外形形状を測定している。

3. 加工プロセスによる肉厚分布の影響

表2に A1100 アルミニウム管材を用いたスピニング加工を行った実験結果を示す。表中には、加工治具の加工経路4種類とそれに伴ってきた製品の断面図を示す。X軸方

* 山梨大学工学部機械工学科 准教授

向から加工する CASE I 及び II と Y 軸方向から加工する CASE III 及び IV の結果を示す。CASE IV は、加工治具による曲げの影響が大きく、目的形状への加工が困難であった。CASE I 及び III では、材料先端部の肉厚が小さい様子がわかる。一方、CASE II では、材料先端部の肉厚減少を抑制できた。以上のことから、加工経路によって、製品形状が大きく影響することを確認した。これらの結果から、目的形状を得るためには、加工経路と製品形状とのデータベースを構築する必要があると考えられる。

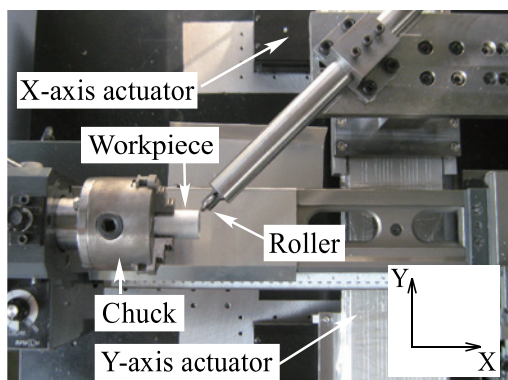


図 1 スピニング加工機

表 1 スピニング加工機の性能

X 軸の最大推力 [N]	1138
Y 軸の最大推力 [N]	1150
送り速度範囲 [mm/rev]	0.01~10
被加工材回転速度 [rpm]	340~1200

表 2 工具経路と加工後の断面図

CASE	工具経路	断面図
I		
II		
III		
IV		

4. 加工プロセス推論システムにおけるデータベース構築方法

4.1 実験条件

図 2 に目的形状を、表 3 に被加工材形状の寸法を示す。先述のように、スピニング加工は逐次成形であるため、加工毎の状況から目的形状までの各ステップの押込み量が成品精度に対して重要な因子となる。そこで、これらの状態を把握するためにあらかじめ、加工半径を 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 および 9.5 [mm] の状態まで加工し、目的形状である加工半径 $R=10$ [mm] まで一回で加工した。それぞれの加工中の半径に対してローラ工具の押込み量は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 および 3.0 [mm] の 6 条件とした。なお、実験温度は 220 [°C] とした。

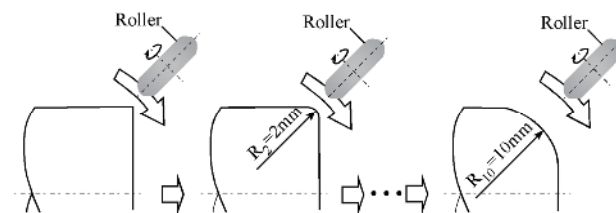


図 2 目的形状

表 3 被加工材形状の寸法

被加工材外径 D_1 [mm]	25.0	
被加工材内径 D_2 [mm]	22.0	
つかみ部の長さ L' [mm]	16	
被加工材長さ L [mm]	36	

4.2 目的形状に対する加工限界領域

図 3 に実験から得られた目的形状(加工半径 $R=10$ [mm])に対して一回の加工パスで加工可能な加工限界領域を模式的に示す。図中において、加工が成功した領域が I、被加工材がチャックから外れて加工が失敗した領域が II である。被加工材形状の半径が 7.0~9.5 [mm]、工具経路半径増分が 0.5~2.5 [mm] では加工は成功した。被加工材形状の半径が 7.0 [mm]、工具経路半径増分が 3.0 [mm] においては加工が失敗した。従って制約条件は、工具経路半径増分の最大値 2.5 [mm] が適切であると判断した。

図 4 にパス毎の目的形状と実形状の最大誤差を示す。誤差は各回数のパスにおいて異なることを確認した。最大誤差は概ね -0.5 [mm] ~ 0.5 [mm] の範囲であった。従って、評価関数において、誤差の範囲は -0.5 [mm] ~ 0.5 [mm] とした。これら実験結果に基づいて、次章に示すメンバーシップ関数および If-Then ルールのパラメータを決定した。

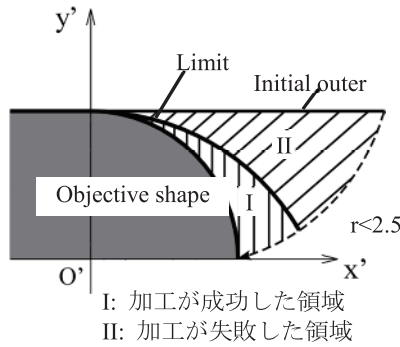


図3 一回の加工パスでの加工限界領域

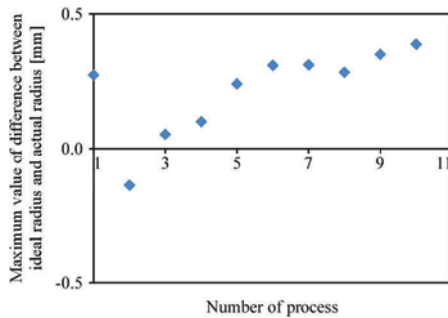


図4 パス毎の目的形状と実形状の最大誤差

5. ファジィ援用加工プロセス制御システム

5.1 工具経路

工具経路の制御は実際にはローラ工具先端丸み部の中心座標の軌跡を制御する。図5にローラ工具と被加工材との幾何学的関係を示す。被加工材形状の座標 $C(C_x, C_y)$ は式(1)、工具経路であるローラ工具先端丸み部の中心座標 $R(R_x, R_y)$ は式(2)で算出される。

$$\begin{cases} C_x(\alpha) = r_n \left\{ \cos(\alpha) - \frac{\pi}{2} \right\} \\ C_y(\alpha) = r_n \left\{ \sin(\alpha) - 1 \right\} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_x(\alpha) = -\frac{\pi}{2} r_n + (r_n + \rho_R) \cos(\alpha) \\ R_y(\alpha) = -r_n + (r_n + \rho_R) \sin(\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 n は加工回数で、 r_n は n 回目の加工時における加工半径である。 ρ_R はローラ工具の先端丸み半径、 α は線分 $O'R$ と x' 軸とのなす角度である。ローラ工具は半径 $(r_n + \rho_R)$ の円弧において、 $0[^\circ]$ から $90[^\circ]$ を $9[^\circ]$ 毎に 10 等分した円弧の点の間を、管のチャック側から端末へ向けて指示した座標を移動するように制御する。 r_n は $r_1=1[\text{mm}]$ から $r_{10}=10[\text{mm}]$ まで $1[\text{mm}]$ 毎に増加させ、 n が 10 回で目的形状になるように設定した。

5.2 画像処理技術

目的形状と実際の形状との間には図4に示したように誤差が発生する。この誤差は各パス回数において異なることが確認されたので、各パスにおいて加工終了時に逐次形状を計測し、工具軌跡を修正する。そこで、本研究では画

像処理技術を使用した工具軌跡制御アルゴリズムを製作し、適切に工具が移動できるようにした。

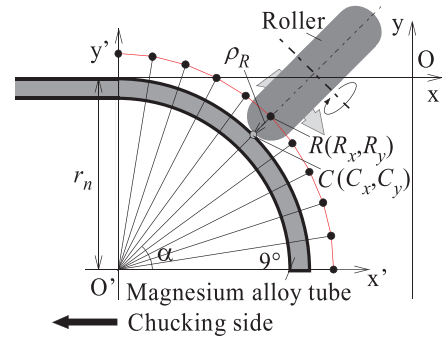


図5 ローラ工具と被加工材との幾何学的関係

5.3 評価関数

図6に加工後の被加工材形状と目的形状との関係を示す。被加工材形状の任意角度 α における目的形状の座標を $V(v_x, v_y)$ 、実際の形状の座標を $U(u_x, u_y)$ とし、誤差 $d_n(\alpha)$ を線分 UV と定義する。図7に4章の実験から得られた角度 α における目的形状の半径と被加工材形状の半径の関係を模式的に示す。被加工材形状の半径 r_{nideal} は加工開始点 ($\alpha=90[^\circ]$) から管端末部 ($\alpha=0[^\circ]$) に向けて増加し、相関があることを確認した。各角度における被加工材形状の半径を線形近似すると、 $d_n(\alpha)$ は式(3)で算出される。

$$d_n(\alpha) = L_n - r_{nideal} \quad (3)$$

$d_n(\alpha)$ を評価関数に適用してファジィモデルを作成し、製品精度向上を図る。また、加工回数低減のためには、積極的に加工量を増やす必要がある。しかし、加工量が増大すれば加工不良が生じやすくなるため、適切な加工量を設定する必要がある。従って、トレードオフの関係が成立するのでファジィを用いて適切に加工量を制御する。そこで、加工回数低減のために図8に示す工具経路の半径増分を $\Delta r_n(\alpha)$ として評価関数に適用した。 $\Delta r_n(\alpha)$ は式(4)で算出される。

$$\Delta r_n(\alpha) = r_n(\alpha) - r_{(n-1)}(\alpha) \quad (4)$$

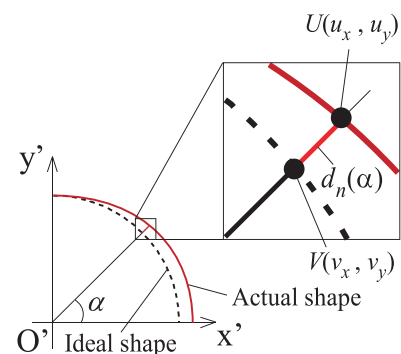


図6 加工後の被加工材形状と目的形状

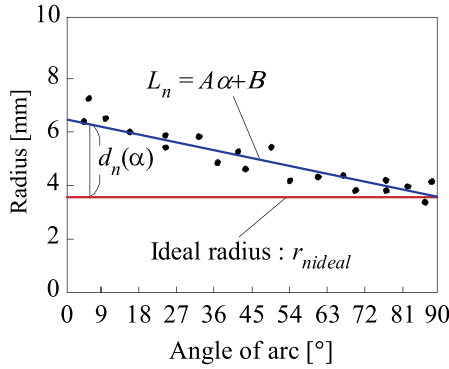


図7 目的形状の半径と被加工材の半径

5.4 ファジィによる工具経路半径増分の推論

図9にメンバーシップ関数を、表4にIf-Thenルールを示す。これらのメンバーシップ関数とIf-Thenルールを用いて工具経路半径増分 $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ の推論を行う。式(5)に $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ を示す。

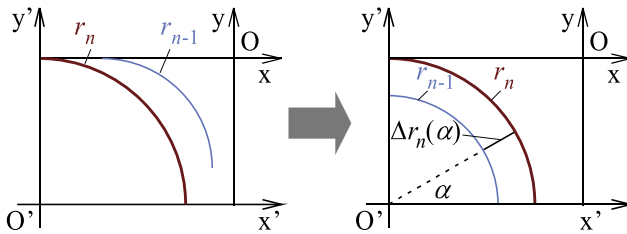


図8 工具経路の半径増分

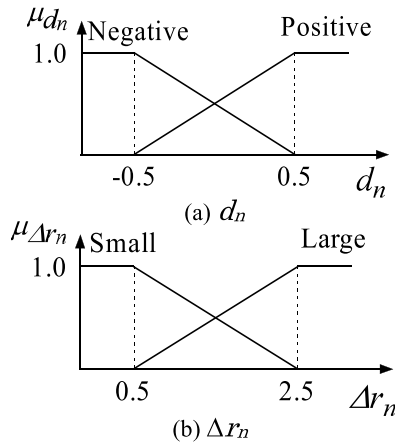


図9 メンバーシップ関数

表4 If-Then ルール

If	Then
Δr_n が小さく, d_n が+	$\Delta r_{SP} = 2.5$
Δr_n が小さく, d_n が-	$\Delta r_{SN} = 2.0$
Δr_n が大きく, d_n が+	$\Delta r_{LP} = 1.0$
Δr_n が大きく, d_n が-	$\Delta r_{LN} = 0.5$

$$\Delta r_{(n+1)}(\alpha) = \frac{\sum_j \mu_{d(\alpha)} \cdot \mu_{\Delta r_n(\alpha)} \cdot \Delta r_j}{\sum_j \mu_{d_n(\alpha)} \cdot \mu_{\Delta r_n(\alpha)}} \quad (5)$$

ここで, j はメンバーシップ関数と If-Then ルールの種類 S(=Small), L(=Large), P(=Positive), N(=Negative)である. 工具経路の半径 $r_{(n+1)}(\alpha)$ は $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ より算出する. 式(6)に $r_{(n+1)}(\alpha)$ を示す.

$$r_{(n+1)}(\alpha) = \sum_{n=1}^{n+1} \Delta r_n(\alpha) \quad (6)$$

5.5 工具経路探索法

工具経路 $R_{opt}(R_{xopt}, R_{yopt})$ は $r_{(n+1)}(\alpha)$ より算出する. 式(7)に $R_{(n+1)opt}(R_{(n+1)xopt}, R_{(n+1)yopt})$ を示す.

$$\begin{cases} R_{(n+1)xopt}(\alpha) = -\frac{\pi}{2} r_{(n+1)ide}(\alpha) + \{r_{(n+1)}(\alpha) + \rho_R\} \cos(\alpha) \\ R_{(n+1)yopt}(\alpha) = -r_{(n+1)ide}(\alpha) + \{r_{(n+1)}(\alpha) + \rho_R\} \sin(\alpha) \end{cases} \quad (7)$$

ここで, $r_{(n+1)ide}$ は目的形状の工具経路の半径であり, 加工開始点の決定に用いられる. $r_{(n+1)ide}$ は式(6)において, 誤差が生じない場合の $r_{(n+1)}(\alpha)$ の値として算出される.

5.6 システム概要

前節の工具経路に基づいて, ファジィ援用加工プロセス制御システムを開発した. 図10にシステムの概略図を示す. スピーニング加工機はパソコンにより制御した. 被加工材形状は CCD カメラを使用して画像処理を行い計測した. スピーニング加工機のローラ位置制御は直行する 2 軸のアクチュエータを使用した. 画像処理, 工具経路探索およびローラ位置制御は開発したアプリケーションにより実行する. 図11に本研究で使用したファジィ援用加工プロセスのためのフローチャートを示す. このフローチャートに従い工具を制御した.

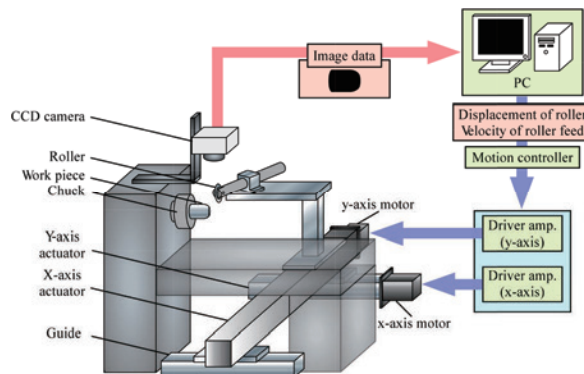


図10 ファジィ援用加工プロセス制御システム

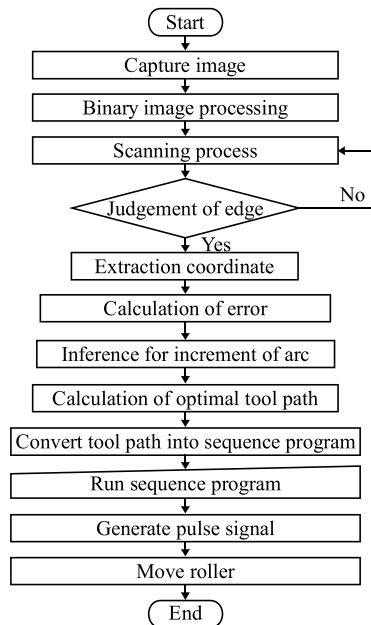


図 11 ファジィ援用加工プロセスのフローチャート

6. ファジィ援用加工プロセス制御システムを用いたマグネシウム合金管端末部スピニング実験

6.1 実験方法

実験条件は 4 章と同一である。ファジィ援用加工プロセス制御システムを適用した工具経路は、初期の目的形状を $r_f=1[\text{mm}]$ とし、通常の加工では加工後に $r_f=1[\text{mm}]$ から $r_{f0}=10[\text{mm}]$ まで $1[\text{mm}]$ 毎に増加させ、ファジィ援用加工プロセス制御システムを適用する加工では、加工毎に工具経路を探索して r を増加させ、 $r_n=10[\text{mm}]$ で加工終了とした。

6.2 実験結果

図 12 に加工後の被加工材形状を示す。最適工具経路探索法を適用した場合において目的形状と実際の形状との間の最大誤差は $0.28[\text{mm}]$ であり、最適工具経路探索法を適用しない場合の誤差は $0.50[\text{mm}]$ を大きく下回った。さらに、加工回数においても、最適工具経路探索法を適用した場合は 7 回になり、加工回数の低減が確認された。

7. 結言

ファジィ援用加工プロセス制御システムを適用したスピニング加工機を開発し、実験により以下の結論を得た。

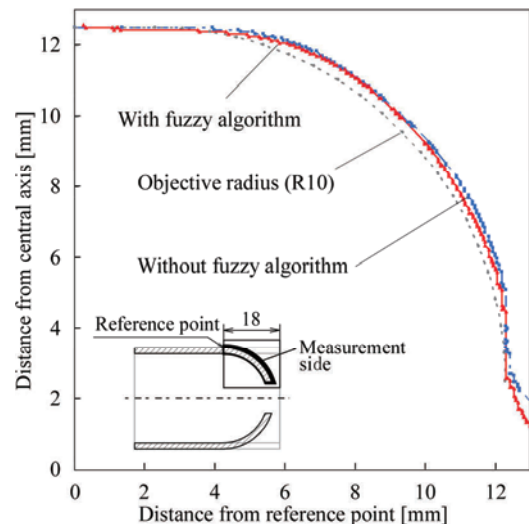


図 12 加工後の被加工材形状

- 1) 旋盤を改良して製作したスピニング加工機でマグネシウム合金管端末部のスピニング加工における基礎実験を行い、データベースを構築して、メンバーシップ関数と If-Then ルールのパラメータを決定した。
- 2) ローラ工具と被加工材の幾何学的関係からファジィを用いて工具経路を探索するファジィ援用加工プロセス制御システムを開発した。
- 3) 工具経路探索法を適用した場合、誤差の減少が確認され、工具経路探索法による製品精度の向上と加工回数の低減を確認した。

間の最大誤差は $0.28[\text{mm}]$ であり、最適工具経路探索法を適用しない場合の誤差は $0.50[\text{mm}]$ を大きく下回った。さらに、加工回数においても、最適工具経路探索法を適用した場合は 7 回になり、加工回数の低減が確認された。

謝 辞

本報告は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成 (AF-2008020) によって実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、山本：軽金属，**58-11**(2008)，pp.570-576.
- 2) 吉原ほか：塑性と加工，**38-348**(1997)，pp.348-353.
- 3) 楊ほか：塑性と加工，**34-395**(1993)，pp.1320-1325.
- 4) 宮沢ほか：塑性と加工，**34-394**(1993)，pp.348-353.
- 5) S. Yoshihara, et al : J. Mater. Process. Technol., **153-154** (2004), pp.816-820.