

プロセス習熟機能を有する レーザー計測緩用知能化インクリメンタル成形機の開発

北澤君義*

1. はじめに

量産を可能にする金属プレス成形は、豊かな20世紀の構築に貢献した。しかし、この金型形状を転写するプレス成形方式は、多品種少量生産へ対応しにくいと、必要な物を必要な量だけ、しかも、修繕しながら使用する21世紀の環境時代には適応しにくい。ここで取り上げるインクリメンタル成形は、金型形状を薄板に転写するプレス成形と異なり、工具の運動により描かれる形状（工具包絡面形状）に薄板を成形する新しい形状創成技術であり、1990年代に世界に先駆けてわが国で開発された技術である。筆者は、「子供が小さな指で欲しい自動車の絵を描いたら、その形状の自動車ボディがあつという間に成形できる」そんな夢を追い求めて、この技術の開発を進めてきた。この薄板CNCインクリメンタル成形(1)-(3)は、薄板に対する工具の相対的な運動により創成される工具包絡面形状に薄板を成形することができるため、薄板塑性加工の多品種少量生産化・オーダーメイド生産化への対応を可能にする迅速生産法の一つとして注目されている。筆者はいままで、開発したCNCインクリメンタル成形機を用いて、金属薄板を様々な形状のシェル形状に成形可能なことを実験的に示すとともに、適切な工具パスの選択により、肉厚制御や不整形回避が可能になることを明らかにしてきた。これらの結果は、適切な工具パスの選択により、スプリングバック・レスの高精度仕上げ成形が可能になることを示唆している。しかしCNCインクリメンタル成形では工具パスの選択自由度が非常に高いと、工具パスの探索が試行錯誤的に行われており、高精度仕上げ成形、肉厚制御、不整形回避を可能にする最適な工具パスの自動探索手法の開発がこの成形における重要な課題の一つになっている。

そこでここでは、インクリメンタルフォーミングにおいて最大の課題として残されている工具パスの自動探索に関する知能化手法を提案し、その有効性を開発する知能化CNCインクリメンタル成形システムを用いて実証する。まず成形中に成形形状のレーザー計測が可能な知能化CNCインクリメンタル成形機を開発し、この開発機へ、レーザー計測情報をもとに高精度仕上げ成形パスを推論するニューラルネットワーク学習推論システムを組み込み、知能化CNCインクリメンタル成形システムを構築する。次にこの開発機を用いて鋼板・アルミ合金板の壺状シェルと浅底シェルの高精度仕上げ成形を行い、ニューラルネットワークの学習を行う。そして学習後のシステムを用いて、材質・板厚・形状の異なるシェルの仕上げ成形を行い、スプリングバック・レス状態に近い高精度仕上げ成形が可能になることを示す。

紙面の都合もあるため、ここでは、薄板のCNCインクリメンタル成形における高精度仕上げ成形、肉厚制御、不整形回避を可能にする工具パススケジュールの自動探索（工具パス自動推論）に関する知能化手法のうちから、将来的にインパクトが大きいと思われる工具パス自動推論による高精度成形に関する成果を中心に述べる。すなわち、成形中にシェル形状をレーザー計測し、そのデータをもとに、仕上げ成形形状を修正するための工具パススケジュールを自動的に予測する「形状修正アルゴリズム」を中心にして、このアルゴリズム適用による「形状修正過程中的シェル形状の予測」と「スプリングバック問題の解決」について述べる。

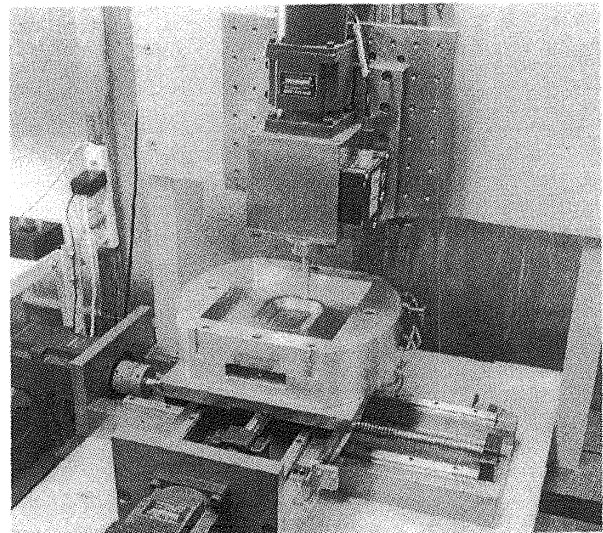


図1 CNCインクリメンタル成形機の概観（写真は四角すい台シェルの張出し成形途中）

2. CNCインクリメンタル成形機の開発

フライスタイプのCNCインクリメンタル成形機を研究室で試作した（図1）。この成形機では、試料薄板を取り付けたブランクホルダーがX、Y方向に、棒状工具とレーザー計測機を取り付けたテーブルがZ方向に移動する。さらにXY面に対して垂直に配置された棒状工具を回転させることができる。立フライスタイプの4軸コンピュータ数値制御成形機である。またこの成形機は、パソコン上で汎用言語を用いて作成した数値計算プログラムによって動作する。すなわち、成形に必要な数値情報（工具軌跡・送り速度）はインターフェイス（RS232C）を介してパソコンからコントローラに送信され、成形機の各軸のサーボモータが駆動する。ブランクホルダーは試料薄板をクランプしたまま取り外し、反転させることができる。またレーザー計測

い台シェル、四角すい台シェル、小判形シェル形状を様々な条件下で成形したデータをもとに構成されている。

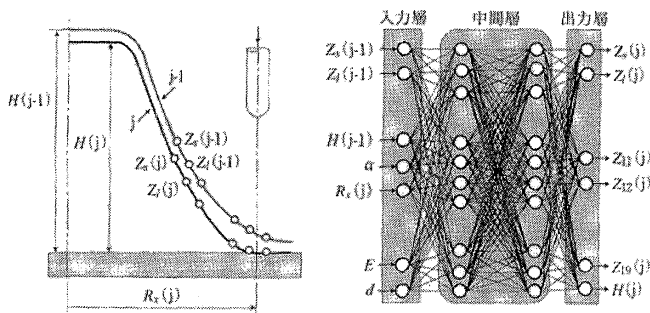


図3 仕上げ成形中のシェルの変形形状を推論するニューラルネットワーク

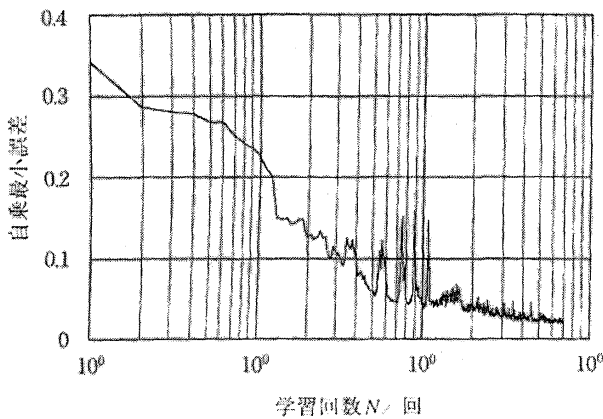


図4 ニューラルネットワークの学習過程における誤差収束例 (N=705)

3.2 検証実験方法

実験には、レーザー計測機能を搭載したフライスタイプのCNCインクリメンタル成形機（開発機）を用いた。試料薄板として、市販の硬質アルミニウム板 (A1100-H24: 板厚 0.6mm) および冷間圧延鋼板 (SPCC-SD: 板厚 0.6mm) から 200×200mm の正方形形状に切断された薄板を用いた。先端球径 10mm の棒状工具を用い、棒状工具を薄板面に垂直に配置した。また棒状工具の送り速度を 2.1mm/s に設定し、潤滑剤としてペースト状二硫化モリブデンを使用し、これを工具と薄板の双方に塗布した。

3.3 形状修正過程中的シェル形状の予測

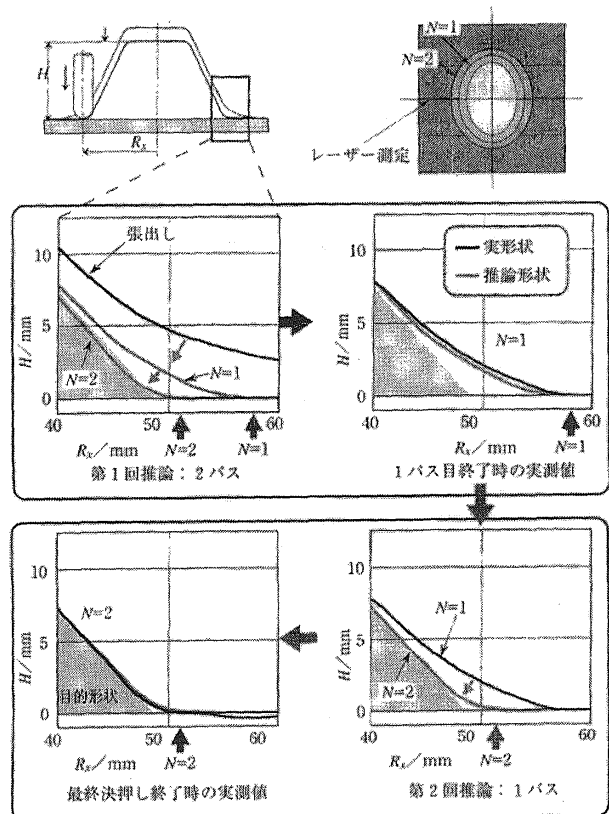
図5に仕上げ成形における裾野部輪郭形状の履歴を示す。同図上が第1回目の推論で、同図下が第2回目の推論を示している。まず上図左に示すように、張出し成形時の輪郭形状を入力として第1回目のNN推論をした。その結果、横軸上の矢印の位置を2回決押しを施せば、最終的にN=2の輪郭形状になると推論された。そこで実際に1パス目に決押しを施したところ、上図右に示されるような輪郭形状

となった。この結果は、第1回目の推論が実形状の輪郭形状の傾向を高精度にとらえていることを示している。さらにこの上図右の結果を誤差逆伝播学習させ、再び決押し後の実形状輪郭を入力として2パス目を推論すると下図右のようになった。この推論結果からは、目的シェル形状に対して幾何的に一意に決定する最終決押し位置に、次の決押しを施すことにより、目的シェル形状（図中の塗りつぶし部分）になることが予測された。最終決押し位置で決押しを施したところ、下図左に示す形状が得られた。この決押し後の実形状は、ほぼ目的シェル形状と一致している。以上の結果から、提案する「形状修正アルゴリズム」を用いると、シェル高さだけでなく、シェル裾野部輪郭形状も高精度に予測できることが明らかになった。

図5 形状修正過程における推論形状と実形状の履歴

3.4 スプリングバック問題の解決

スプリングバックの影響を回避する方法として、レーザー計測されたシェル輪郭形状の各点のZ座標から、決押し位置のZ座標（スプリングバック量）を引いた値を各点のZ座標として採用した。本来、決押し後、その位置のZ座標は零になるはずであるが、張出し成形された



シェル周囲のたわみ等の影響でスプリングバックが生じる。また決押し位置より内側のシェル形状が製品となるので、決押し位置を零としてシェル高さを補正しても影響は少ないはずである。実際にこの方法を楕円すい台シェルおよび

四角すい台シェルへ適用した結果、表1に示すように楕円すい台シェルではスプリングバックの大きさが最大で0.845mmに達している状況で、高精度の形状修正が可能であった(成形誤差0.28%,シェル高さに換算して0.04mmの精度)。同様に、四角すい台シェルとSPCC材の楕円すい台シェルに対しても高精度仕上げ成形が可能になった。これらの結果から、提案する方法を適用することにより、スプリングバックを考慮した形状修正が可能になることが明らかになった。

表1 形状修正アルゴリズムの検証結果

シェル形状	楕円すい台 $R_x=47.69\text{mm}$ $R_y=57.69\text{mm}$ $\alpha=50^\circ$	四角すい台 $W_x=80.15$ $W_y=95.15$ $\alpha=52^\circ$	楕円すい台 $R_x=35.32\text{mm}$ $R_y=45.32\text{mm}$ $\alpha=45^\circ$
薄板 (板厚/mm)	A1100-H24 (0.6)	A1100-H24 (0.6)	SPCC-SD (0.6)
棒状工具径 /mm	10	10	10
目標シェル高さ H /mm	14.35	12.50	12.20
成形品高さ H_p /mm	14.39	12.56	12.12
スプリングバック 高さ $Z_{s(b)}$ /mm	0.845	0.327	1.035
誤差/%	0.28	0.48	0.66

4. まとめ

本稿では、インクリメンタルフォーミングにおいて最大の課題として残されている工具パスの自動探索に関する知能化手法を提案し、その有効性を開発する知能化CNCインクリメンタル成形システムを用いて実証した。まず成形中に成形形状のレーザー計測が可能な知能化CNCインクリメンタル成形機を開発し、この開発機へ、レーザー計測情報をもとに高精度仕上げ成形パスを推論するニューラルネットワーク学習推論システムを組み込み、知能化CNCインクリメンタル成形システムを構築した。次にこの開発機を用いて鋼板・アルミ合金板の壺状シェルと浅底シェルの高精度仕上げ成形を行い、ニューラルネットワークの学習を行った。そして学習後のシステムを用いて、材質・板厚・形状の異なるシェルの仕上げ成形を行い、スプリングバック・レス状態に近い高精度仕上げ成形が可能になることを実証した。

紙面の都合もあるため、ここでは、将来的にインパクトが大きいと思われる工具パス自動推論による高精度成形化に関する成果を中心に述べた。すなわち、成形中にシェル形状をレーザー計測し、そのデータをもとに、仕上げ成形形状を修正するための工具パススケジュールを自動的に予測する「形状修正アルゴリズム」を中心にして、このアルゴリズム適用による「形状修正過程中的シェル形状の予測」と「スプリングバック問題の解決」に関する成果について報告した。

謝辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究助成(交付No.97010)をもとに行われたことを記し、財団法人天田金属加工機械技術振興財団に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 北澤君義・中島明：日本機械学会論文集 C 編, 62 (1996), 2018.
- (2) 北澤君義・尾角拓勉：日本機械学会論文集 C 編, 62(1996), 2012.
- (3) 北澤君義：軽金属, 47(1997), 145.