

# プロセス習熟化機能を有するレーザー計測援用智能化 インクリメンタル成形機の開発

信州大学工学部環境機能工学科  
助教授 北澤君義  
(平成9年度研究開発助成AF-97010)

キーワード：インクリメンタルフォーミング，  
工具パス自動推論，智能化

## 1. 研究の目的と背景

薄板CNCインクリメンタル成形<sup>(1)-(3)</sup>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。筆者はいままでに、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ため、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。

そこで本研究では、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・アルミ合金板の垂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実証する。

紙面の都合もあるため、本報告書では、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化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」について報告する。

## 2. CNCインクリメンタル成形機の開発

本研究では、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。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。またレーザー計測機で成形品の形状を走査することにより成形中の変形情報を収集する。そしてこの変形情報はリアルタイムでパソコンに送信され処理される。

開発したCNCインクリメンタル成形機では、試料薄板を取り付けたブランクホルダーがXYテーブル上に固定され、このXYテーブルがボールネジを介してACサーボモータでX、Y方向に最大距離300mm、最大送り速度6.35mm/sで駆動する。また棒状工具をマウントしたZテーブルをZ方向に最大距離180mm、最大送り速度6.35mm/sで駆動させることができる。ACサーボモータの駆動制御には、市販のパーソナルコンピュータを利用したオープンループ制御を採用した。この場合、サーボモータには1/100の減速比を持つハーモニックドライブ減速機を用いているため、40000pulse/mmの高分解能を有している。従ってボールネジのバックラッシュを含め、1/1000mm以下の高精度で位置決め制御することができる。

実験には先端球径10mmと16mmの2種類の棒状工具を

用いた。この工具は合金工具鋼 (SKD11) で作られており、焼入れ処理が施されている。また先端球部は研磨してある。ブランクホルダーは、200mm×200mmの薄板を四辺で固定し、最大180mm×180mmの範囲内で薄板を成形することができる。このブランクホルダーはボルト固定式であり、正確な位置決めのもとで、その取り外しと反転ができる。また、薄板を最大40mmの深さまで張出し成形することが可能である。その上、決押し成形を施す際に必要となるバックアッププレートの取り付けが可能となっている。

成形中の変形形状は、Z軸テーブルに取り付けられたレーザー計測機を用いて測定する。この測定したデータは、リアルタイムでパーソナルコンピュータにシリアル転送され、開発したプログラムで処理される。このレーザー計測機は、可視光レーザーを用いた三角測量方式の非接触変位計であり、作動距離188.5mmの位置を基準として±40mmの範囲を測定することができる。

### 3. 工具パス自動推論

#### 3.1 形状修正アルゴリズム

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」を開発した。ここでは、このアルゴリズムの適用による「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」について以下に述べる。

図1に形状修正アルゴリズムの概要を示す。いまj番目の反転決押しルーチンを考える。まずj-1番目のシェルの輪郭形状（レーザー計測値）のうちでシェル裾野部の曲げ余剰変形領域開始点SおよびSからr方向に等間隔にサンプリングした点でのZ座標、シェル高さH(j)、シェル半頂角α、j番目の反転決押し位置Rx(j)、工具直径dと材料パラメータをニューラルネットワークに入力し、j番目の形状を推論する。さらにこのj番目の推論形状を再び入力としてNN推論を繰り返し、推論された最終決押し過程の輪郭形状の高さと目標高さとの差が、設定値以下になるまで推論を繰り返す。その結果、決押し位置の履歴が決定する。そこでこの推論された決押し位置の1パス目に決押しを施す。さらにシェルの輪郭形状をレーザーで計測し、この値をもとに誤差逆伝播学習を行い、次のj+1番目の反転決押しルーチンに移行する。このようにしてオンラインで学習を重ねながら、適切な決押し履歴を経て、最終決押し位置に決押しを施し、仕上げ成形を終了させる。提案するアルゴリズムでは図2に示すように、2層の中間層を有する4層のニューラルネットワークを用いた。入力層には、形状パラメータとしてレーザーで計測された輪郭形状のうち、シェル裾野部の曲げ余剰変形領域開始点SおよびSからr方向に1mmおきに15点とこれよりも外側に2mmおきに4点の合計20点のZ座標、シェル高さH(j)、シェル半頂角α、j番目の反転決押し位置Rx(j)と工具直径d、材料パラメータとしてヤング率Eと降伏応力σYの総合計27個のパラメータを入力した。そして、ユニット数27個を

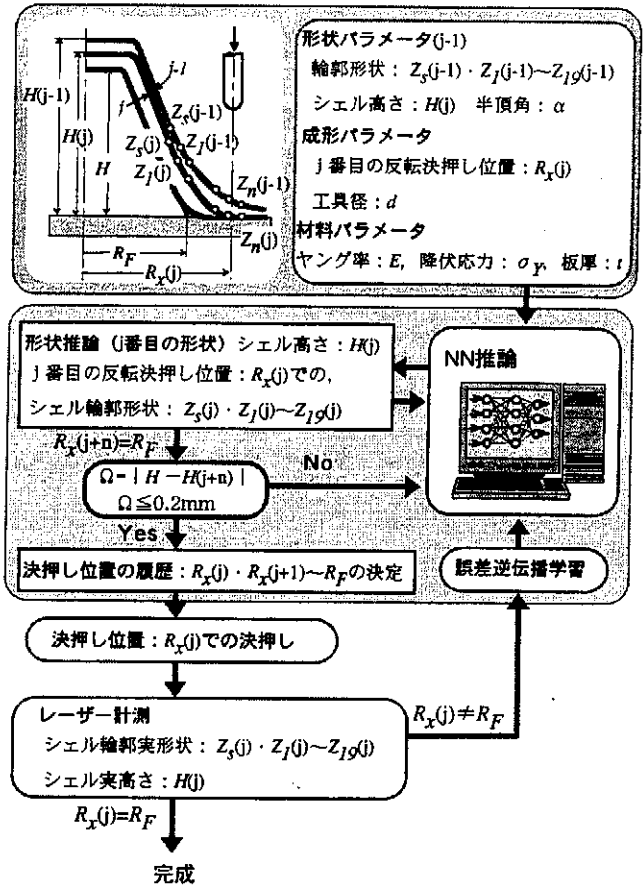


図1 形状修正アルゴリズム

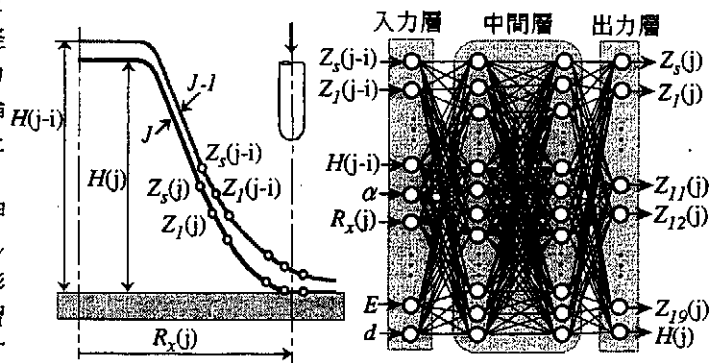


図2 本研究で用いたニューラルネットワーク (シェルの変形形状自体を出力: 推論している)

持つ2層の中間層を経て、入力した反転決押し位置Rx(j)での高さと目標高さの差であるΔhを出力とした。各層のユニットは、次層のユニットと全接続されている。ここではパターン認識という視点から推奨される4層のネットワークを採用した。図3に学習過程の一例を示す。705回の誤差逆伝播学習で誤差5%以内に収束した。なお学習に用いたデータ数は40個であり、このデータバ

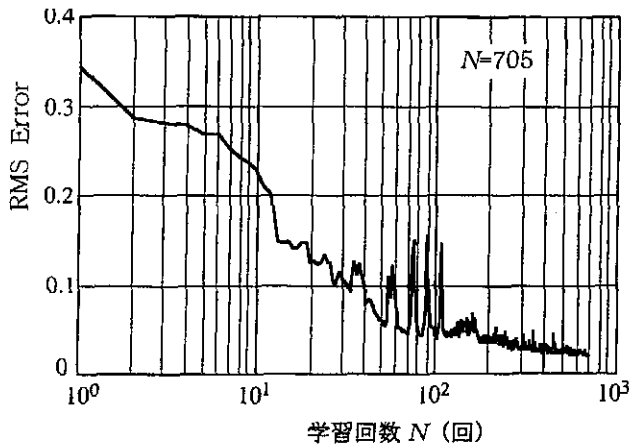


図3 ニューラルネットワークの学習過程における誤差収束例 (N=705)

ースは、楕円すい台シェル、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。

### 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

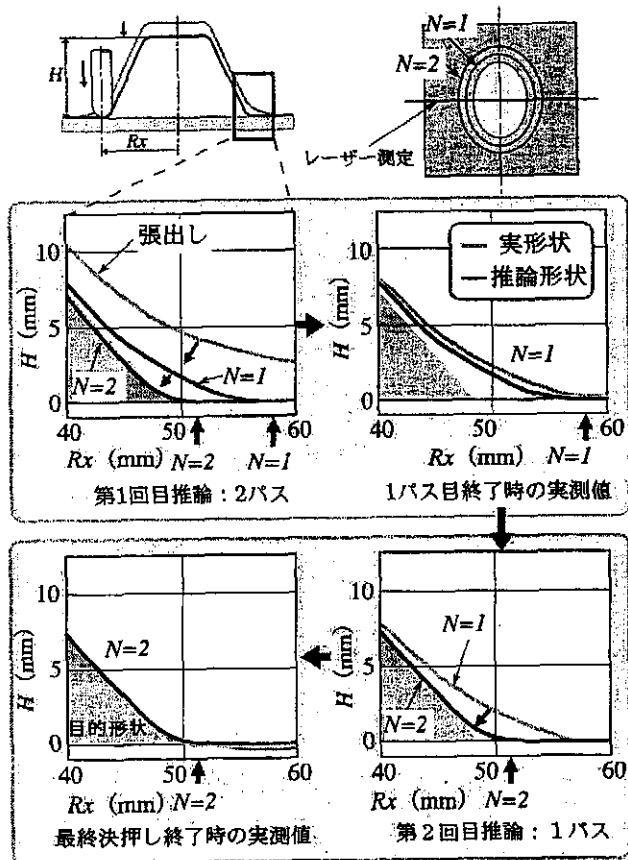


図4 形状修正過程における推論形状と実形状の履歴

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4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。

### 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高さが最大で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	精円すい台 Rx=47.69mm Ry=57.69mm $\alpha=50^\circ$	四角すい台 Wx=80.15mm Wy=95.15mm $\alpha=52^\circ$	精円すい台 Rx=35.32mm Ry=45.32mm $\alpha=45^\circ$
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 Hp (mm)	14.39	12.56	12.12
スプリングバック 高さ $Z_k(i)$ (mm)	0.845	0.327	1.035
誤差 (%)	0.28	0.48	0.66

#### 4. 結言

本研究では、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、本報告書では、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。

20世紀の終盤に、インクリメンタルフォーミングの工具パス自動推論の方法論に関して基本的なスキームが構築され、その有効性が実験的に実証されたことを記す。

#### 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.