

高精度曲げ加工のための知的制御システムの構築

真鍋健一*・楊 明**

1. 緒言

板金加工の高度化に伴い、加工ラインにおける各種加工の高精度化、高柔軟化が要求されている。そのためには、新しいセンサやセンシング手法の導入によって、多くの情報を取り入れ、さらにセンシング情報を知識にレベルアップすることにより職人が持っている高度な知識や勘に近づけることが求められる。また、最近の傾向として、FEM等を用いた加工シミュレーションが加工プロセスの最適化に適用されるようになってきている。シミュレーション精度評価の観点から、金型と素材との接触状態や素材の変形状態の可視化が大変重要であり、さらに機械のたわみや摩擦等の影響要因も正確に把握する必要がある¹⁾。

著者らは板金加工の中で最も加工精度が課題であるV曲げ加工に対して、実験データをデータベースに蓄積し、オンライン制御に適用した知的V曲げ加工制御システムを開発し、高い加工精度と柔軟性のある加工システムを得ることができた²⁾。特に、同一ロットのデータベースが存在する場合、目標曲げ角度に対して誤差が $\pm 10'$ 以内という高精度を達成した。しかしながら、実験データベースに頼っていたため、制御システムの適用範囲や信頼性などの問題がまだ残っており、データベースの充実が不可欠であった。一方、近年、高精度な数値シミュレーション（以後、シミュレーションという）の適用が、塑性加工分野でも広がりつつあり、シミュレーション精度も著しく向上した³⁾。

そこで、本研究ではデータベースの充実を図るためデータベースとして有限要素法によるシミュレーションデータの適用を試みた⁴⁾。しかしながら、解析対象（特に、加工機械の機械特性、環境因子など）の完全なモデリングは非常に困難であるために、その解析結果の定量的な精度には限界が生じている。そのため、著者らはV曲げ加工プロセスの数値シミュレーションデータに対し、モデリング時に欠如する要素を補完するものとして、形状補完フィルタを提案・開発した。また、より高精度かつ異種材料にも適応できる形状補完フィルタの設計・開発を試みた。また、材料の変形過程における特性の異なる

曲線に対して、高分解能な領域分割フィルタを導入することによって高精度なフィルタリングを試みた。フィルタリングプロセスをすべてオンライン制御に組み込むことでシステムの柔軟性を向上させ、事前にV曲げ実験を行わずとも様々な材料に対応したシミュレーションデータベースを構築できる知的V曲げ加工制御システムの構築を目的とする。

2. データベースに基づく制御システムの構成および数値シミュレーションの適用

生産現場では、職人が素材や製品形状を基に適切な工具の組合せと加工プランを決定する。加工中においては、職人は視覚、手の感触、荷重と振動、更においなどを含むセンシング情報の総合評価によって、加工の進行をモニタリングし、外乱や材料特性のばらつきなどに対して、適切に加工条件を修正していく。加工終了後は、製

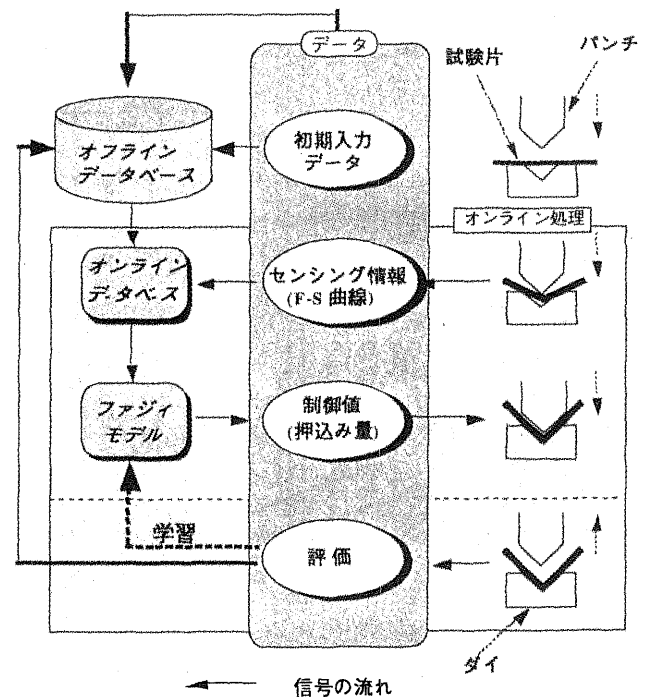


図1 データベースとファジィ推論モデルを用いた曲げ加工制御システムの構築²⁾

品を測定し、加工条件の再評価を行う²⁾。

職人が経験と勘を頼りに加工機械を操ることをヒントに、加工中に計測したパンチ荷重-ストローク曲線 (F-S 曲線) を直接使うことによって加工状況を総合評価し、加工の適応制御を行う新しい加工制御システムが開発されている。その概要を図 1 に示す。F-S 曲線には、あらゆる因子の影響が含まれており、F-S 曲線の形状も互いに異なる。F-S 曲線の特徴抽出によりその相違を幾つかの離散データで表すことが可能である。図 2 は F-S 曲線から離散化ファクター抽出方法の一例を示す。加工中に抽出した離散化ファクターを用いてデータベース (経験的加工情報) の検索を行い、図 3 に示すようなファジィ推論モデルによって比較と最適加工プロセスの決定を行う。すなわち、材料特性の違いや環境条件の変化に対して、従来職人が行ったようにその都度加工情報を総合的に評価し、最適な加工プロセスを決定する²⁾。さらに、経験と知識の獲得などの学習機能を付加することによって、システムの高度化が図られる。

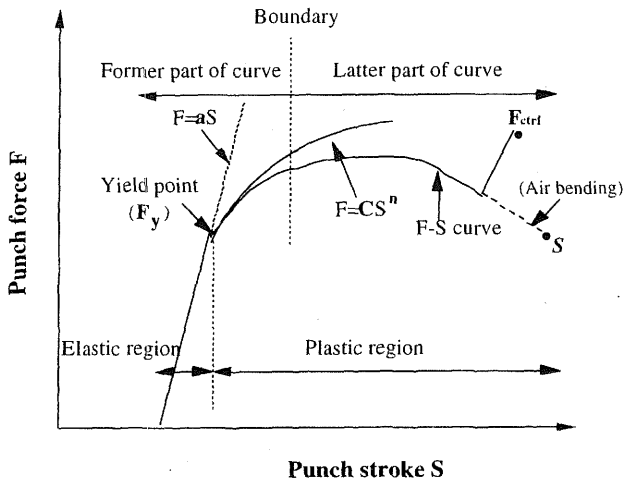
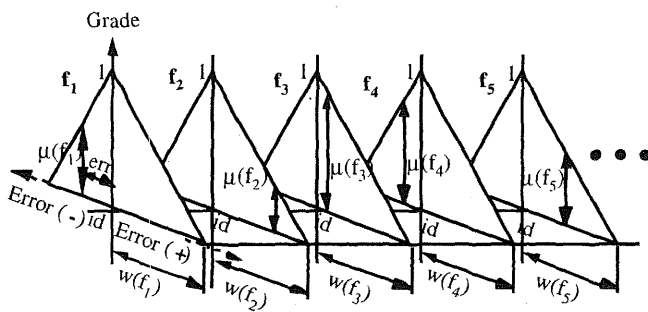


図 2 パンチ荷重-ストローク曲線から離散化ファクターの抽出²⁾



$$W = \mu(f_1) * \mu(f_2) * \mu(f_3) * \mu(f_4) * \mu(f_5)$$

id : 各因子の適合度 w(f_k) : 各因子の適用範囲
f_k : 影響因子 μ(f_k) : 因子の適合度
err : f_k と id の誤差 W : 曲線の適合度

図 3 データベースとファジィ推論モデルを用いた曲げ加工制御システム²⁾

上述システムに対して、実験データベースの適用範囲や信頼性などの問題を補うために、有限要素法を用いた V 曲げ加工シミュレーション及び適応フィルタによるデータベースの充実を行った。図 4 にオンライン適応フィルタを用いたプロセス制御用データベース構築の概念と流れを示す。図に示すように加工中にセンシングした F-S 曲線データを直接フィルタ設計に利用する。FFT (高速フーリエ変換) を用いて、センシングされた F-S 曲線と FEM による V 曲げシミュレーションで得られた F-S 曲線をそれぞれ周波数空間に変換して、スペクトル成分を求める。両曲線のスペクトル成分について比較を行い、スペクトル成分の差をその材料に対するフィルタ係数とする。得られたフィルタ係数を用いて、F-S 曲線の形状補完とスプリングバック予測の補正をそれぞれ行う。補完された F-S 曲線とスプリングバック予測値はオンラインデータベースに蓄えられ、加工の制御に用いられる。

また、加工行程中における材料の変形パターンの変化に対応するために、次の章で述べる領域分割フィルタリング法を用いて F-S 曲線を補正することによって、より高精度な形状補完が可能となる。以上のように、材種の変更や時間とともに変化する F-S 曲線の補正を行う場合、オンライン適応フィルタを形状補完フィルタに適用したほうが有効であると考えられる。さらに、このような形状補完フィルタ係数をスプリングバック量の補正にも用いることによって、高い柔軟性と加工精度が期待できる。

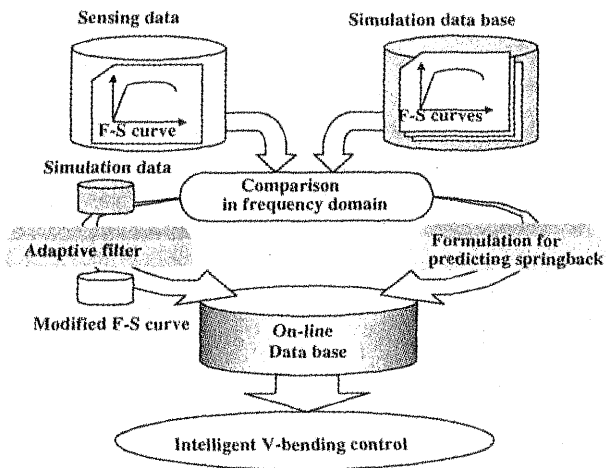


図 4 オンライン適応フィルタによる F-S 曲線補正概要

3. 適応フィルタによるシミュレーションデータの補正

3.1 適応フィルタの概要と適用方法

適応フィルタは未知の入力信号や時間と共に周波数特性が変化する信号に対して、出力信号と理想出力信号との誤差が小さくなるようにフィルタ係数を適応アルゴリズムによって徐々に変えていくことにより、特性が逐次

に変化するような信号に対して、常に最適なフィルタをかけることが可能となる。図5は数値シミュレーションと実験で得られた F-S 曲線一例の比較を示したものである。図から分かるように加工特性の違う材料に対して実験とシミュレーションの誤差の程度と傾向が大きく異なっている。したがって、それを補正するフィルタもそれぞれの材料に合わせて用意する必要がある。そこで、上述した適応フィルタを用いることによって、種々の材料に合わせて、オンラインでフィルタ係数を変えていく、さらに、時間と共に F-S 曲線（パンチ速度が一定であれば、パンチ荷重 F-時間 t 曲線でもある）の周波数の変化に対してもフィルタ係数を変えるようにすれば、一層の高精度かつ高柔軟性の F-S 曲線補正が実現できる。

適応アルゴリズムを用いることによって、種々の材料に対して標準材料特性を用いて曲げ加工の数値シミュレーションを行い、その特性をデータベースに所持していれば、シミュレーションと実験の差への補正は材料種類の違いに対して、加工中に適応フィルタによって、柔軟に対応することができる。また、図5から分かるように曲げ加工で得られた F-S 曲線は一般的に弾性変形領域、降伏点付近での弾塑性変形領域（以後、降伏領域と称す）と塑性変形が支配的な大きな変形領域に分けて考えることができる。各領域において支配するスペクトル成分とその大きさが異なり、曲線のより高分解能な補正を行うためには、領域ごとに補正フィルタを適用する必要がある⁷⁾。そこで、図6に示す領域分割フィルタを用いた F-S 曲線の補正法を提案する。

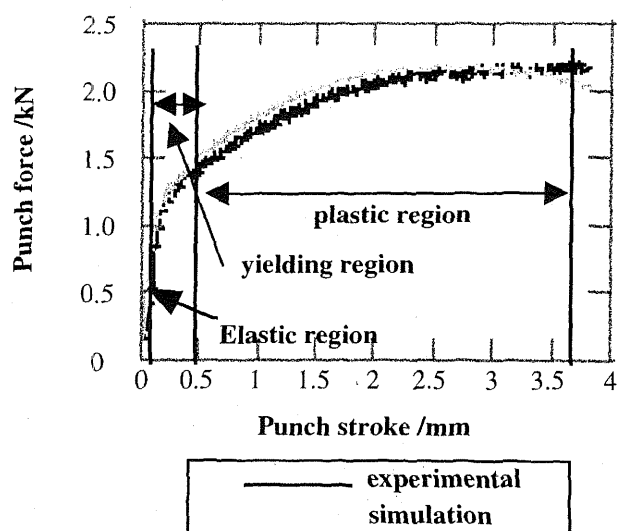


図5 材質の異なる材料を用いたシミュレーションと実験 F-S 曲線 (材料 A5182-0)

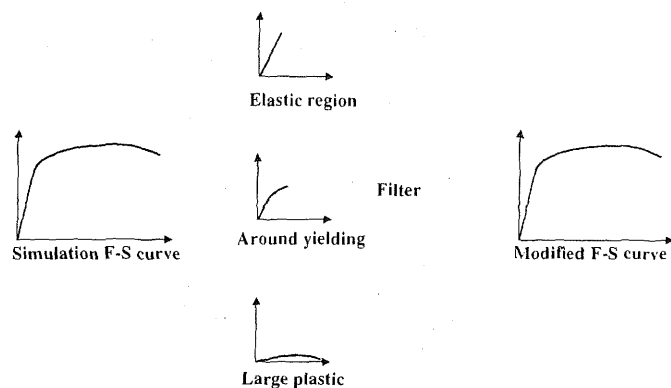


図6 領域分割フィルタによる F-S 曲線補正の概要

さらに、数値シミュレーションによる曲げ加工プロセスの情報は図7に示すように負荷時と除荷時の F-S 曲線を含む。特に除荷時のストロークの変化は加工材料のスプリングバック量に依存し、最終パンチ押込み量を決定するのに最も重要な因子である。負荷時の F-S 曲線に対してはオンラインでその精度評価及び補正を行うことができるが、除荷時ではオンラインでの評価はできない。

そこで、本研究では実験とシミュレーションの F-S 曲線の相違はスプリングバック量の相違と相関があるものとし、負荷時の F-S 曲線に対する精度評価したフィルタ係数を用いて、除荷時のストロークの変化（スプリングバック量に相当）に対する補正を行うこととした。

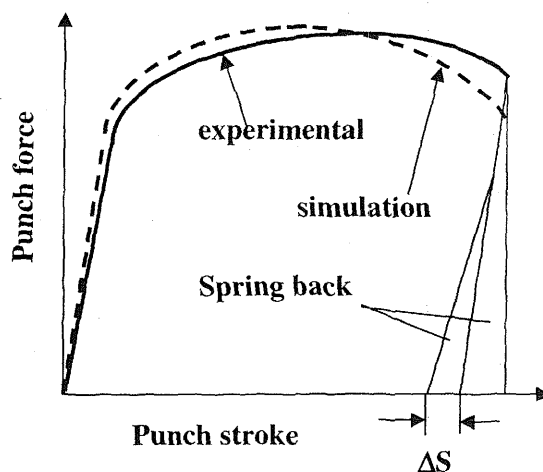


図7 負荷と除荷におけるシミュレーションと実験 F-S 曲線の比較

3.2 F-S 曲線の領域分割フィルタリング

図6に示すように、F-S 曲線を弾性変形領域、降伏領域と大塑性変形領域に分けて、シミュレーション F-S 曲線の領域分割フィルタリングを行った。ここで、弾性変形領域は線形であるので、適応フィルタは降伏領域と大塑

性変形領域に対してのみ適用することにした。図8にそれぞれの領域におけるF-S曲線のスペクトル特性を示す。各領域における主要スペクトル成分は変わらないが、それぞれの強さが異なり、また、シミュレーションと実験結果を比較した場合、その差異も大きく異なることが分かる。そこで、各領域における低周波数での3スペクトル成分に対して、それぞれフィルタ係数を設計し、F-S曲線に対する補正を行うこととした。図9に領域分割フィルタリングを適用した場合のF-S曲線補正結果を示す。また、F-S曲線全域を一つのフィルタで補正を行った場合の補正精度の比較を図10に示す。図10は、F-S曲線全域に対して補正されたシミュレーション曲線と実験曲線との誤差を用いて表したものである。図から分かるように、単一フィルタより領域分割フィルタによる処理のほうが曲線全域にわたって、誤差が均等に小さく抑えられている(図10(a))。特に降伏点付近におけるF-S曲線の急激な変化にも領域分割フィルタリングによってシミュレーション曲線が実験曲線に精度よく補正されている

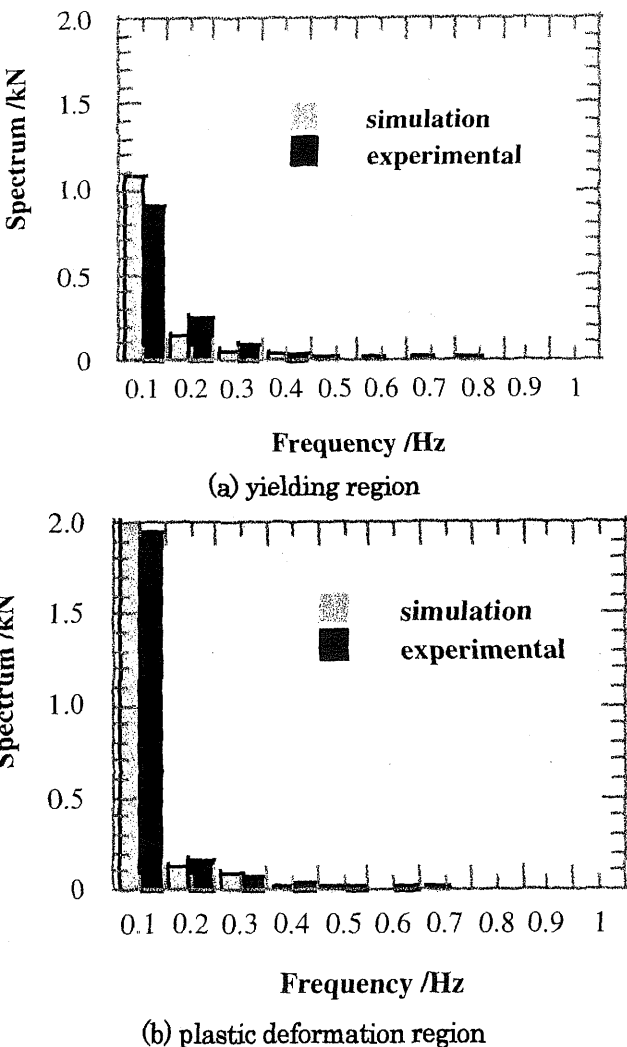


図8 F-S曲線の(a)降伏域と(b)大塑性変形域における周波数成分

ことが分かる(図10(b)参照)。以上結果から、領域分割フィルタのほうが単一フィルタより有効であり、高精度な補正法であると言える。

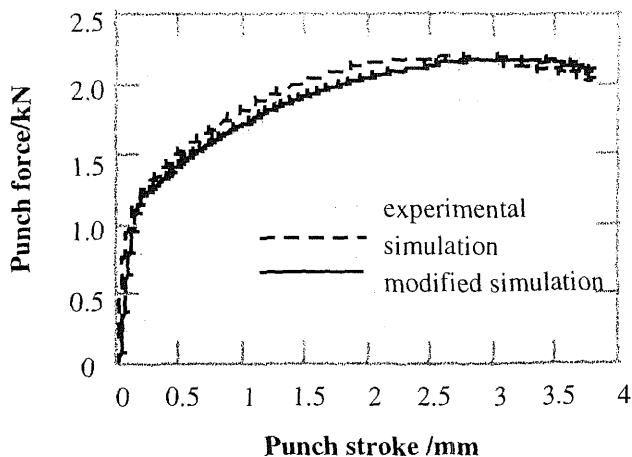


図9 領域分割フィルタによって補正されたF-S曲線(A5182-0)

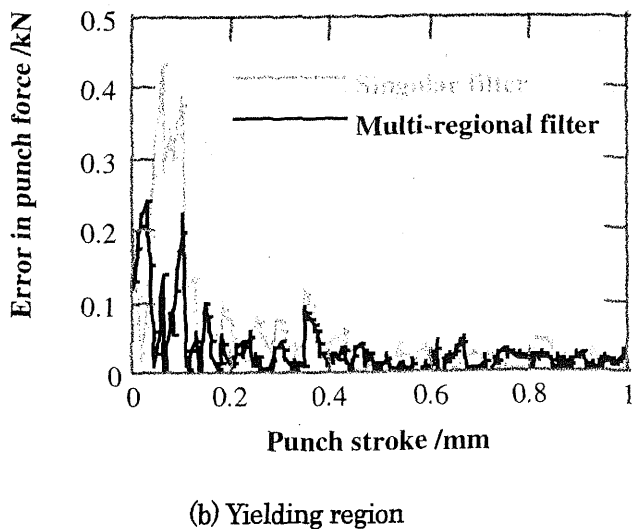
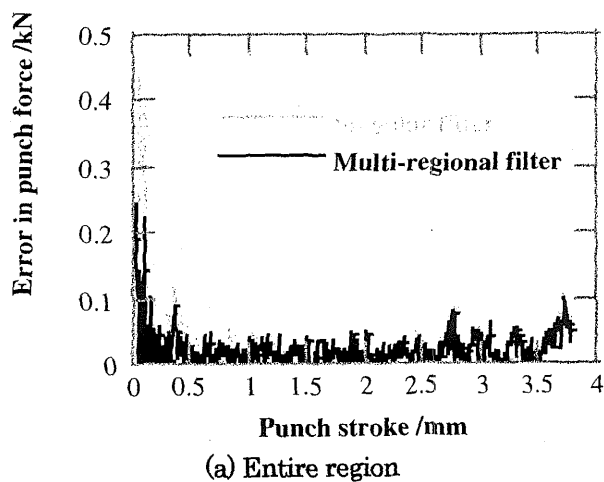


図10 単一フィルタと領域分割フィルタによる補正F-S曲線の精度評価(A5182-0)

3.3 スプリングバック特性の予測

本研究ではシミュレーションデータの最終パンチ押込み量 S_d に対して、オンラインで設計したフィルタ係数を用いて補正を行った。図11に実験とシミュレーションの比較として、V曲げにおける最終パンチ押込み量とスプリングバック量を考慮した最終曲げ角度の目標角度(90度)からのずれとの関係(以下 $S-\Delta\theta$ 線図)を示す。図より $S-\Delta\theta$ の関係は線形であり、しかも目標曲げ角度近傍において両者の差異はほぼ一定であるとみなせる。この関係を利用してシミュレーションの $S-\Delta\theta$ 関係に対して補正を行う。ここでは、実験とシミュレーションの $S-\Delta\theta$ 関係をそれぞれ近似し、その近似式の切片を適応フィルタの補正係数の一次関数とし、その係数は、A5182-O, SPCD, C2600-O, SUS304 の4種類の実験材料のシミュレーションと実験の $S-\Delta\theta$ の差異を用いて最小二乗法によって求めた。得られた切片を用いてシミュレーション $S-\Delta\theta$ 直線を補正し、最終パンチ押込み量を予測する $S-\Delta\theta$ 直線を得ることができる。4種類の異なる材料に対して、平均精度が $\pm 20'$ の補正精度が得られていることから、十分広範囲の材料に適用できることが分かった。

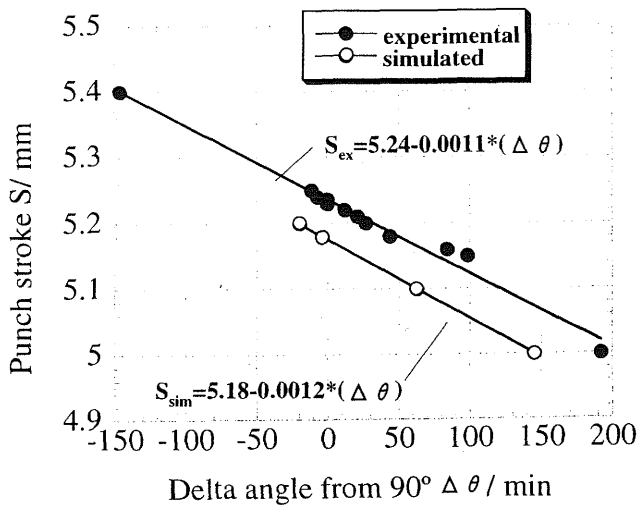


図11 実験とシミュレーションによる曲げ角度とパンチストローク関係の比較 (SUS304)

4. 制御システムの精度評価

数値シミュレーションデータベースを用いた知的V曲げ加工制御システムに対し、オンライン適応フィルタとスプリングバック量補正ルーチンを組み込んだ場合における本制御システムに関するの精度評価を行った。知的

V曲げ加工制御システムの評価は、センシングデータの代わりとなる既にあるV曲げ実験データと、同ロットの材料で行った引張試験の結果より作成したシミュレーションデータを基に、コンピュータ上で加工対象とするブランクに対して最適な最終パンチ押込み量値 S_d を決定し、その結果を既存の実験結果と比較することによって行うものである。

供試材はA5182-O, SPCD, C2600-O, SUS304の4種類の材料を使用した。引張試験の結果から、A5182-O材とSPCD材はべき乗硬化型材料であるのに対して、

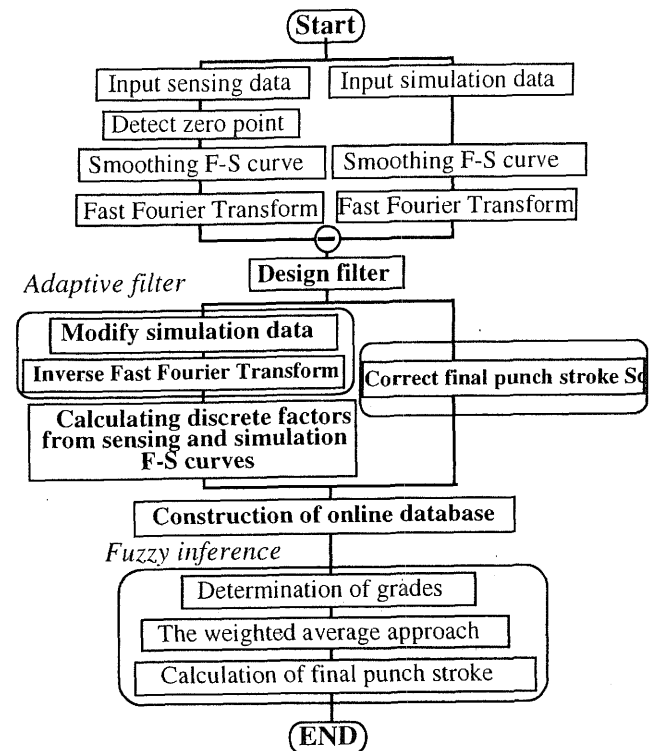


図12 V曲げ加工制御システムの評価流れ

C2600-O材とSUS304材は直線硬化型に近い材料である。このような材料特性の異なる4種類の材料に対して、図12に示す流れで制御システムの評価を行った。

まず、既存の実験データとシミュレーションデータを入力し、それぞれのF-S曲線に対してFFT変換を行う。領域ごとにフィルタを設計し、シミュレーションデータのF-S曲線のフィルタリングを行う。並行してフィルタ係数を用いて、最終ストロークの補正も行う。補正されたシミュレーションデータはオンラインデータベースに保管される。データベースのF-S曲線と加工ブランクのF-S曲線をファジィ推論モデルによって比較・評価し、最終パンチ押込み量の推論を行う。

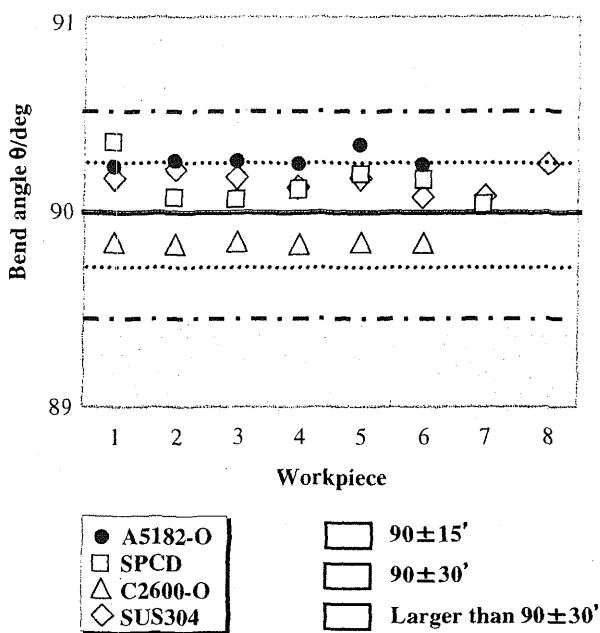


図13 適応フィルタを用いたプロセス制御された曲げ角度精度のオフライン評価

目標曲げ角度を90°とした時のオンライン適応フィルタを用いた知的V曲げ加工制御システムの評価を図13に示す。各材料とも一部のデータを除いて90°±15'の精度に収まっていることが分かる。また、同一種類の材料においては、プランクごとの材料特性のばらつきに対して、曲げ角度のばらつきが小さく、安定した加工精度が得られていることが分かった。これはシステムの改良による更なる精度の向上が可能であると考えられる。これより、オンライン適応フィルタが各材料に十分対応し、オンライン上で構築されたシミュレーションデータベースが本制御システムに適用可能であることが確認された。

5. 結 言

本研究では、高精度V曲げ加工のためのデータベースとファジィ推論モデルを用いた知的制御システムを構築した。シミュレーションデータベースに基づく制御システムの更なる高精度と高柔軟性を実現するために、FEMで得られたF-S曲線から擬似実験データベースを作成する形状補完適応フィルタの設計・開発を試みた。計測したF-S曲線をシミュレーションデータベースにあるもの

をオンラインで直接比較し、加工中の材料により適したフィルタの設計を可能にした。また、材料の変形過程における特性の異なる曲線に対して、高分解能な領域分割フィルタを導入することによって高精度なフィルタリングを実現した。フィルタリングプロセスをすべてオンライン制御に組込むことでシステムの柔軟性を向上させ、事前のV曲げ実験を行わずとも様々な材料に対応したシミュレーションデータベースを構築できる知的V曲げ加工制御システムを開発した。以下に示す結果からも本研究で提案・開発したシミュレーションデータベースとオンライン適応フィルタを用いた知的V曲げ加工制御システムは適用範囲の拡大と高精度化を実現したことが示された。

- (1) 領域分割フィルタの導入によって、単一フィルタより高精度なF-S曲線形状補正を実現した。
- (2) フィルタ係数を最終パンチ押込み量の予測に用いることによって、異種材料にも対応できる安定したS- Δ θ 補正ができた。
- (3) オンライン適応フィルタを組込んだ制御システムを評価した結果、本V曲げ加工システムは変形特性の異なる4種類の材料に対して±15'の曲げ精度が得られた。

謝 辞

この研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の助成金によって行われたものである。ここで、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 楊 明: 塑性加工における知的センシング, 塑性と加工, 41-474(2000), 653-657.
- 2) Yang, M., Manabe, K. & Nishimura, N.: J. Mater. Process. Technol., 60 (1996), 859-860.
- 3) Yang, M., Kojima, N. & Manabe, K.: JSME Int. J. Series C, 40-1(1997), 157-162.
- 4) Makinouchi, A: J. Material Process. Techno., 60(1996), 19-26.
- 5) 楊明・真鍋健一・相川直幸・小川秀夫: 塑性と加工, 39-449(1998), 603-607.
- 6) Yang, M., Manabe, K.: J. Metals and Materials, 43(1998), 315-318.
- 7) 南 茂夫: 科学計測のための波形データ処理, (1991), CQ 出版社.

*. 東京都立大学大学院 工学研究科 教授
 ** 工学研究科 助教授