

金型の加工誤差補償システムの開発 (第3報)

加工誤差予測を基盤とするカッターパス補正ソフトウェアの開発

門藤至宏, 中濱久雄, 西川隆敏*, 菊田敬一*, 岡野 仁*, 山下弘之*

Compensation system for machining error of die and mold III

Development of tool-path revision software based on machining error prediction

MONDO Munehiro, NAKAHAMA Hisao, NISHIKAWA Takatoshi*, KIKUTA Keiichi*,
OKANO Hitoshi* and YAMASHITA Hiroyuki*

Practical computer software is proposed for cutting-tool path revisions of die and mold. Both dynamic deflection and defective shape of tool cause the machining error to be reduced. The software generates new cutting-tool paths by applying the calculated error to the original path delivered from general CAM software. By use of this software, the machining error is reduced from 25.2 micrometer to 6.1 micrometer in our prototype.

金型切削中の工具たわみと工具形状誤差に起因する加工誤差を補正するためのソフトウェアを試作した。このソフトウェアは、加工誤差データを元のカッターパスに適用し、新しいカッターパスを出力する。新しいカッターパスは、加工中の工具の動的挙動を考慮した上で、所望の軌跡を得られるように補正される。このソフトウェアにより、試作加工において経路補正前で $25.2 \mu\text{m}$ あった加工誤差が、 $6.1 \mu\text{m}$ に低減した。

キーワード：金型，切削加工，加工誤差，カッターパス，CAM

1. 緒 言

プレス金型の作製工程では、所望の金型が得られるまで、切削加工とすり合わせによるクリアランス（金型間の隙間）の調整作業が繰り返し行われる。特に大型金型では、通常約 $50 \mu\text{m}$ 以上の加工誤差が発生し、多大な時間とコストを掛けてその修正が行われている。その加工誤差発生の一因として、市販のCAMソフトから出力される加工軌跡（カッターパス）に、加工中の工具の動的挙動が考慮されていない事が指摘されている。加工中の工具は、切削力による”たわみ”が発生するため、実際には工具先端は設計されたカッターパスを通過していない。その”たわみ”を考慮に入れたカッターパスにより、出来るだけ再加工の回数を減らし、生産性の向上・低コスト化に貢献する事が本研究の目的である。たわみ量の予測には、事前実験による工具自身の物性値（形状・剛性）とシミュレーションから得られる加工時の切削抵抗予測値が必要となる。切削抵抗予測については、予測位置における工具の切削箇所や切削深さを求めることで可能となる。本報告では、予測された加工誤差を元のカッターパスに反映する部分における検討結果を述べる。

2. 加工誤差予測

加工誤差予測の目的は、加工時の工具経路で発生する誤差を予測し、補正された工具経路を作成・使用することによる高精度加工を実現することである。我々は、既にグラフィックスハードウェアの描画機能により高速に切削力を予測するシステムを開発している¹⁾。そこでは、切削領域の推定や比切削抵抗モデルによる切削力の計算が可能である。被削材の初期形状、直前までの工具軌跡（掃引体）、工具の現在位置（予測位置）を、同一画面上に色を変えて多重描画し、被削材の内側から工具刃先を観察する視点で眺めた際、工具の色が確認できる領域が切削領域である。工具刃先を微小切刃に分割し、各切刃での加工を判定し、分力を求め、その総和から1回転分の切削力予測値を得る。次に、切削力による工具のたわみや工具の形状誤差による加工誤差を求める。工具1回転中のたわみは、予測された1回転中の切削力を高速フーリエ変換した結果 $F(\omega)$ と、インパルス加振実験から得られる工具のコンプライアンス伝達関数 $G(\omega)$ の積から周波数領域の工具たわみ $D(\omega)$ が求まり、その逆フーリエ変換から求まる²⁾。工具形状誤差については、使用する工具（ここではボールエンドミル）の回転中の最外径を、複数の工具軸断面において予め測定し、理想形状との差を求めておく。推定される加工誤差は、これらの成分の和になる。

2009. 5. 15 受理 加工技術研究部

* 西部工業技術センター生産技術アカデミー
生産システム研究部

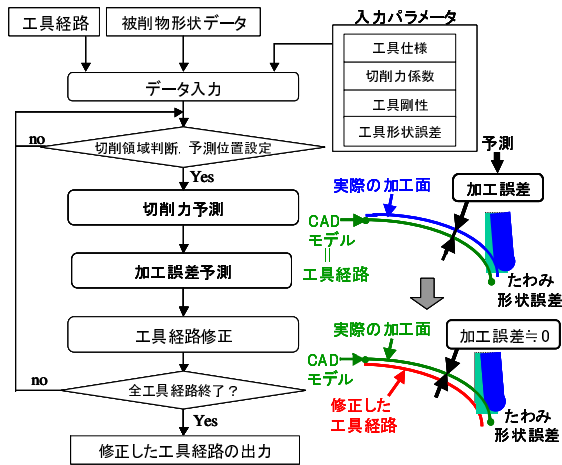


図1 本システムの処理フロー

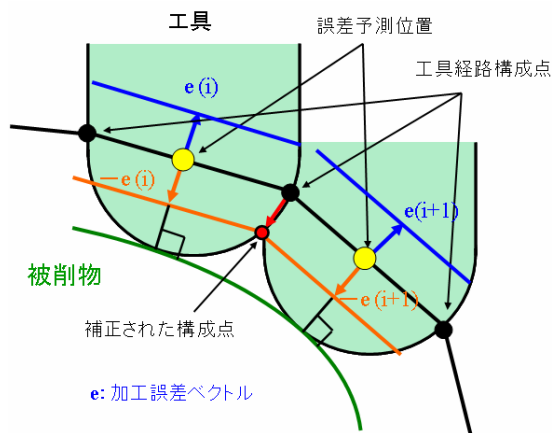


図2 誤差予測位置と工具経路

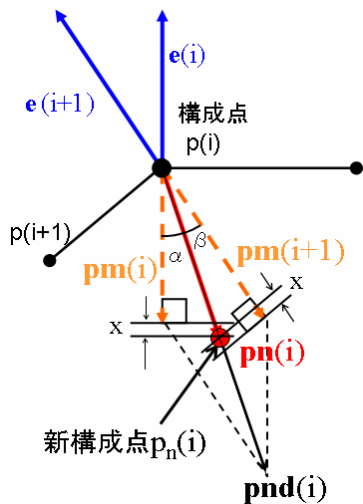


図3 加工誤差修正方法

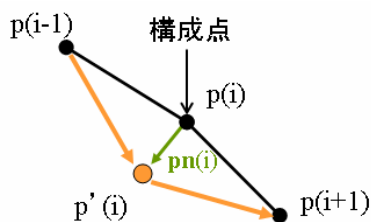


図4 直線補正例

3. カッターパス修正

3.1 修正ベクトル

本システムの処理フローを図1に示す。全工具経路について、予測された加工誤差を反映する必要がある。加工誤差予測位置と工具経路の関係を図2に示す。工具は工具経路構成点を結ぶ直線を通り、構成点で経路が変わる。経路の変化点では、切削抵抗が急変し、一意に誤差を求めることが困難であるため、加工誤差予測位置は工具経路内での切削の有無を判断し、工具経路上で切削が行われている箇所内の1点としている。その加工誤差予測位置において、先述の加工誤差予測手法を用いて加工誤差ベクトル e を求める。このベクトルと同じ大きさで、反対方向に補正することで、所望の工具軌跡が得られる。工具経路構成点と加工誤差ベクトルから、新構成点を得る方法を図3に示す。加工誤差ベクトル e は、たわみによる加工誤差ベクトルと工具形状誤差や振れによる加工誤差ベクトルを合成したものである。まず、各構成点の加工誤差ベクトル e と同じ大きさで、反対方向のベクトルを修正基準ベクトル (pn) とする。また、修正ベクトル (pn) は、その方向は隣り合う修正基準ベクトルの和方向となり、その大きさは pn の各 pn 成分の差 (図中の x 表記) が等しくなる長さで定義する。加工誤差、法線方向ベクトル、カッターパスデータを元に、各修正ベクトルを算出する。

3.2 加工種別

加工種別としては直線加工 (G01 指令) と円弧加工 (G02, G03 指令) がある。円弧加工には、加工面の制約 (G17 指令: XY 平面, G18 指令: ZX 平面, G19 指令: YZ 平面) があり、基本的に指定面外方向の加工ができない。データの表現様式としては、絶対値 (G90 指令) と相対値 (G91 指令) がある。

3.3 直線補正

直線補正の一例を図4に示す。この図は、 i 番目の構成点 $p(i)$ が、 $pn(i)$ の補正を受け、 $p'(i)$ にシフトした場合を表現している。 $p(i-1) \rightarrow p'(i)$ の直線加工については、座標値として、絶対値表現では $p(i)+pn(i)$ を与え、相対値表現では、(補正前の相対値) $+pn(i)$ を与えれば良い。これに対し $p'(i) \rightarrow p(i+1)$ の直線加工については、座標値として、絶対値表現では $p(i+1)$ を与え、相対値表現では、(補正前の相対値) $-pn(i)$ を与える事になる。直線補正の場合は、加工面の制約がないため、直接誤差補正が行える。

3.4 円弧補正

円弧の補正手順を図5に示す。工具経路の円弧指令は、始点・終点と円弧中心、あるいは、始点・終点と円弧半径により定義される。加工誤差予測精度を向上させるために、始点・終点間に仮の構成点を一定間隔で設け、その中間点で修正基準ベクトル pn を求め、円弧補正のガイドラインとする (図5(a))。求めた修正基準ベクトル pn

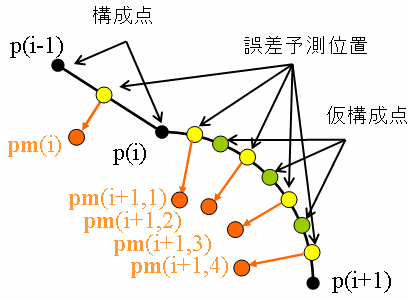


図 5(a) 仮構成点設定・pm 計算

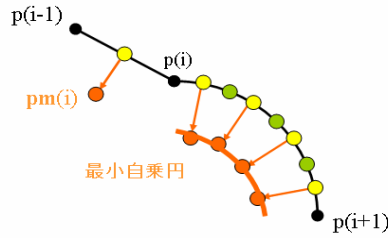


図 5(b) 最小自乗円計算

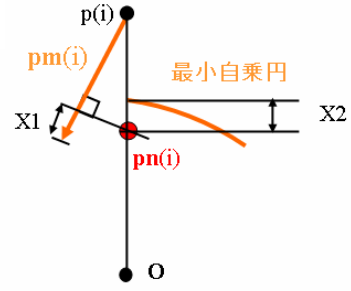


図 5(c) 始点側 pn 計算

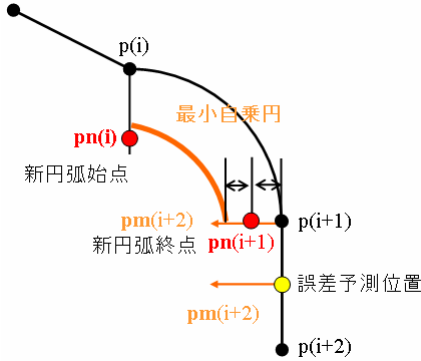


図 5(d) 終点側 pn 計算

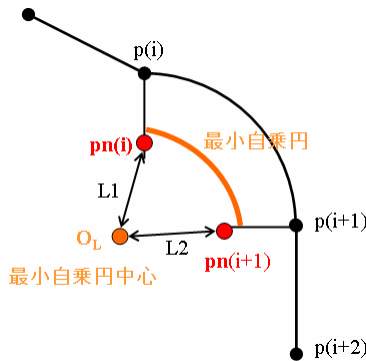


図 5(e) 最小自乗円中心距離計算

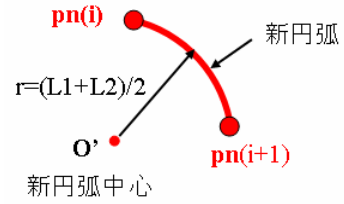


図 5(f) 新円弧中心計算

から、最小自乗法により近似円を求め (図 5(b))、この近似円に基づいて補正する。中心座標 (a, b)、半径 r の近似円の方程式を式 (1) とし、式 (2) の関係を定義すると、式 (1) を偏微分した結果により式 (3) が導出される。この式において、各座標値の演算から中心座標及び半径が求まる。ここで (Xi, Yi) は i 番目の誤差予測位置座標であり、全ての誤差予測位置の総和をとるものとする。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (1)$$

$$A = -2a, B = -2b, C = a^2 + b^2 - r^2 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum X_i^2 & \sum X_i Y_i & \sum X_i \\ \sum X_i Y_i & \sum Y_i^2 & \sum Y_i \\ \sum X_i & \sum Y_i & \sum 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum -X_i(X_i^2 + Y_i^2) \\ \sum -Y_i(X_i^2 + Y_i^2) \\ \sum -(X_i^2 + Y_i^2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

近似円と、元の円弧開始点 P、元の円弧中心 O、pm(i) の関係から、直線と円弧の接続点における差 (x1, x2) が等しくなるように pn(i) を求め、新円弧の開始点とする (図 5(c))。次に終点側の構成点 p(i+1)、p(i+2) の中間点で修正基準ベクトル pm(i+2) を求め、始点の場合と同様に pn(i+1) を求める (図 5(d))。pn(i)、pn(i+1) と最小自乗円中心との距離 (L1 及び L2) を求め (図 5(e))、その差を平均化する位置を新円弧中心 O' とし (図 5(f))、補正後の円弧が決まる。単独円弧の補正例を図 6 に示す。この図は、円弧部分が、pn(i)、pn(i+1) の補正を受け、始点が p'(i)、終点が p'(i+1) にシフトした場合を表現している。

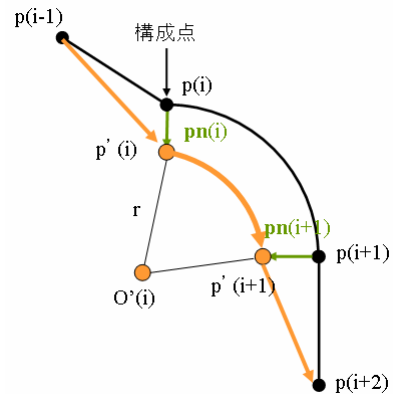


図 6 円弧補正例

円弧の場合は、加工面の制約があるため、加工面以外の軸方向の誤差補正は、円弧前後の直線部分で調整するか、ヘリカル補正 (加工面外の工具移動を許容する補正方法) を利用する。前者では、円弧が連続した場合、補正処理が複雑になる。

4. 試作したソフトウェア

試作したソフトウェアの動作画面例を図 7 及び図 8 に示す。このソフトウェアの構成は、データ入力部 (工具パラメータ、初期形状、荒加工から仕上げ加工までの cutter パス)、誤差予測部、cutter パス修正部からなる。開発環境は Microsoft Visual Studio 2008 で、NET Framework 3.5 を利用し、Visual C++ により作成している。また、描画ライブラリとして、OpenGL を利用している。図 7 は

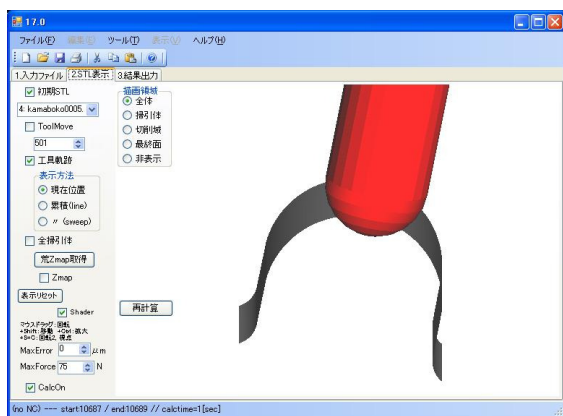


図7 ソフトウェアの動作画面（グラフィック描画）

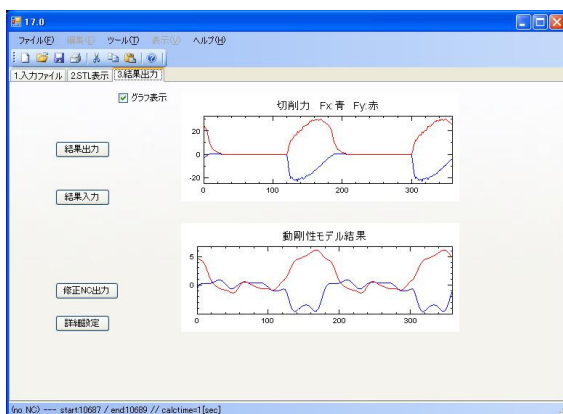


図8 ソフトウェアの動作画面（グラフ描画+NC出力）

元の cutterパス毎に加工誤差を予測中の画面例を示し、図8は工具1回転中において計算された切削力、及び動剛性モデルにおける工具たわみのグラフ表示実行中の画面例を示している。更に予測された加工誤差と元の cutterパスデータを用いて、修正 cutterパスを出力する。

5. パス修正結果

加工誤差予測結果と元の工具経路を入力とし、試作したソフトウェアを用いて出力した新工具経路による加工実験結果を図9に示す。目標形状はかまぼこ型で、切削時に同じ高さを経路とする等高線加工、及び切削時に高さを変える経路をとる走査線加工の双方において、直線加工のみを用いて試作した結果である。半円の半径 15mm に対し、誤差を拡大して表現している。ここで、特に等高線加工において、経路補正前では最大 25.2 μ m あった加工誤差が、補正後に 6.1 μ m に減少しており、補正処理の有効性を示している。

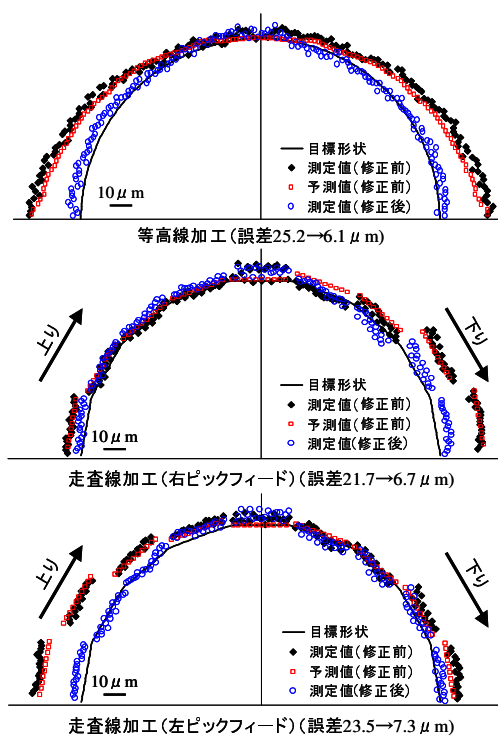


図9 加工実験結果

6. 結 言

工具の加工時の動的たわみや形状誤差が加工誤差を生じ、再加工による生産性の低下やコスト増を招いている。その動的たわみや形状誤差を考慮した加工誤差データを、元の工具経路に反映させるソフトウェアを作成し、切削実験の結果から補正処理の有効性を示した。今後は、円弧補正処理部分を実装し、実金型への適用に向けた開発を行う。

謝 辞

本研究の推進にあたり、多大なるご指導・ご協力を頂きました埼玉大学大学院理工学研究科の金子順一助教に、深謝致します。

文 献

- 1) 菊田他：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告，51，26（2008）。
- 2) 西川他：広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告，52，40（2009）。