



# 工具系の弾性変形に起因する加工誤差の予測結果に基づく加工誤差補正

西田, 勇  
白瀬, 敬一

---

(Citation)

精密工学会誌, 85(1):91-97

(Issue Date)

2019-01-05

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 精密工学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006021>



# 工具系の弾性変形に起因する加工誤差の予測結果に基づく 加工誤差補正\*

西田 勇\*\* 白瀬 敬一\*\*

Machining Error Correction Based on Predicted Machining Error  
Caused by Elastic Deflection of Tool System

Isamu NISHIDA and Keiichi SHIRASE

A machining error correction, which is based on the predicted machining error caused by elastic deflection of tool system, is proposed. This method is based on an instantaneous force with static deflection feedback model which is classified to consider the milling process representation. The uncut chip thickness, which is required to predict cutting force, is calculated under the consideration of the elastic deflection of the tool system, which corresponds to tool and tool holder deflections caused by cutting force. In our previous study, the uncut chip thickness is calculated from voxels removed by each minute tool rotational angle, and the instantaneous cutting force in a minute time interval can be predicted. Furthermore, in our previous study, the elastic deflection of the tool system caused by the predicted instantaneous cutting force can be calculated. This study proposes the method to correct the tool position and posture according to the predicted horizontal displacement and the rotational displacement derived from the elastic deflection of the tool system. In order to validate the effectiveness of the proposed algorithm, the experimental milling operations were conducted. The experimental results showed that the successful error corrections can be performed. The correction of the tool position and posture according to the predicted elastic deflection of the tool system can achieve the improvement of machining accuracy and efficiency.

**Key words:** error correction, high accuracy, tool deflection, voxel model, end-milling operation, NC machining

## 1. 結 言

現在、切削加工においては、コンピュータによる数値制御で動作する NC 工作機械が世界中で広く普及しており、必要となる部品形状を高精度に高効率で加工できることから、多くの製造現場で利用されている。NC 工作機械は NC プログラムとよばれる数値制御プログラムによって駆動される。つまり、NC 工作機械は NC プログラムで指示されている工具送り速度や工具位置および姿勢に従って加工を行うため、NC プログラムでのこれらの指示は重要である。これらを最適に決定して、高精度加工を高効率に実現することが必要となっている。切削加工の加工効率を向上させるためには、加工状況を把握し切削条件を適切に設定することが重要となる。加工状況を把握する目的で切削力推定の研究が行われ、これまでに多くの切削力モデルが提案されてきた。過去に研究された切削力シミュレーションの手法の1つに瞬間切削力モデルがある<sup>1)4)</sup>。瞬間切削力モデルは工具切れ刃と被削材の干渉量から比較的容易に現実的な切削力の計算を行うことができる。瞬間切削力モデルによる切削力の予測には、工具切れ刃と被削材の干渉量を算出する必要があるが、被削材をボクセルモデルで表現することで工具切れ刃の実切込み厚さを計算する方法がこれまで多く提案されている<sup>5)11)</sup>。それらの中でも、著者らは、被削材をボクセルモデルで表現する従来の切削シミュレータ<sup>5)</sup>を拡張して、工具切れ刃の形状も微小間隔の点群で離散的に表現し、工具 1 刃当たりの送り量ごとの解析ではなく、工具微小回転量ごとの解析を可能とする切削シミュレータを新たに開発している<sup>11)</sup>。さらに著者らは、微小時間および微小空間分解能で切削現象の事前予測が可能となる新しいシミュ

ュレータを応用して、工具系の弾性変形に起因する加工誤差の予測が可能な切削シミュレータを開発している<sup>12)</sup>。そこで、本研究では、工具系の弾性変形の予測結果に基づき、加工面の加工誤差を補正する方法を提案する。工具系の弾性変形によって生じる水平方向の変位と傾斜方向の変位について、工具位置および姿勢を修正することで、加工誤差を低減する。切削力の予測シミュレータを利用したボールエンドミル加工の加工誤差を修正する研究は従来にもあるが<sup>13)</sup>、それらは工具系の弾性変形によって生じる水平方向の変位のみを考慮していた。本研究では、工具系の水平方向および傾斜方向の変位を考慮して、工具位置だけでなく、工具姿勢も修正する点が新しい。本研究で提案する方法の妥当性を検証するために切削加工実験を行い、工具位置および姿勢を修正しない場合と修正する場合の加工面の断面形状を比較して、加工誤差が低減できることを実証した。

## 2. ボクセルモデルを用いた微小時間および微小空間分解能での切削力シミュレーション

切削現象のシミュレーションにおいて、従来からボクセルモデルを用いて離散的に切削現象をシミュレーションする手法が提案されてきた<sup>5)</sup>。ボクセルモデルとは、図 1 に示すように 2 次元要素ピクセル(Pixel)を 3 次元に拡張した立方体状のものであり、3 次元形状をボクセルで埋め尽くし、形状全体を離散的に表現することができる。これにより、複雑形状の加工においても、工具と被削材の干渉量をボクセルの個数で計算することができ、演算処理が簡易であるという利点がある。著者らはボクセルモデルを用いて、従来の工具 1 刃当たりの送り量ごとの解析ではなく、図 2 に示すように工具微小回転量ごとに解析を行うことで、微小時間および微小空間分解能で切削現象のシミュレーションが可能となる新しいシミュレータを開発している<sup>11)</sup>。本シミュレータでは、図 2(a)に示すような工具微小回転量ごと

\* 原稿受付 平成 30 年 7 月 3 日

掲載決定 平成 30 年 9 月 20 日

\*\* 正 会 員 神戸大学 (兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)



の解析ステップにおいて、図 2(b)に示すように工具を工具軸方向に沿って微小薄板要素に分割して、微小薄板要素ごとに工具中心と工具切れ刃を結ぶ線分上に存在するボクセルを判定して、工具と被削材との干渉量を算出している。本シミュレータでは、工具切れ刃の軌跡に忠実な解析が可能となるだけでなく、微小時間および微小空間分解能で切削現象のシミュレーションが可能となるため、工具系の弾性変形を考慮した解析が可能となる。

本シミュレータでは、干渉量(実切込み厚さ)から切削力を予測する計算は瞬間切削力モデル<sup>14)~16)</sup>を踏襲している。瞬間切削力モデルでは、図 3 に示すように、工具を工具軸に沿って微小薄板要素に分割して、個々の要素ごとに微小切削力を計算する。この微小切削力を力の方向を考慮しながら足し合わせて、工具に作用する切削力を求める。微小切削力は各薄板要素の切れ刃先端に作用すると仮定し、切れ刃に垂直な面内での加工を二次元切削状態で近似している。それぞれの薄板要素に作用する切削力の接線方向成分  $dF_t$ 、半径方向成分  $dF_r$ 、軸方向成分  $dF_a$  は以下の式で表される<sup>17)</sup>。

$$dF_t = [K_{te} + K_{te} h(\theta, z)] dz \quad (1)$$

$$dF_r = [K_{re} + K_{re} h(\theta, z)] dz \quad (2)$$

$$dF_a = [K_{ae} + K_{ae} h(\theta, z)] dz \quad (3)$$

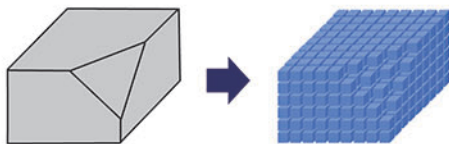
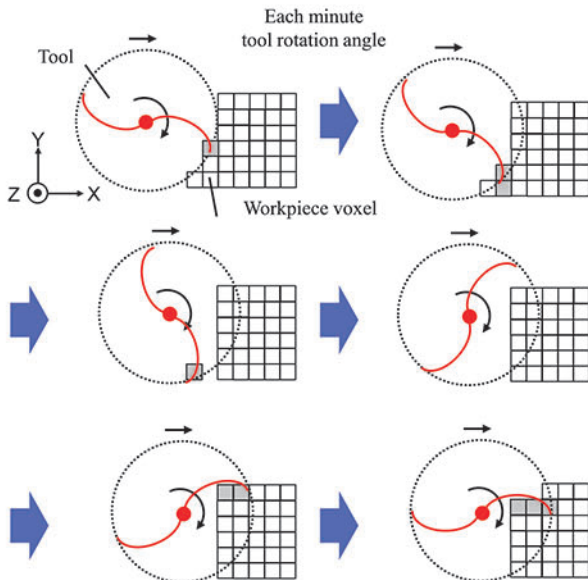
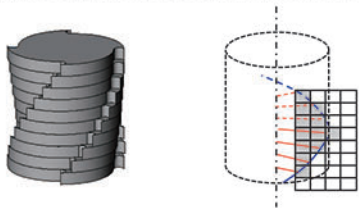


Fig.1 Workpiece representation by voxel model



(a) Extraction of removal voxels in each minute tool rotation angle



(b) Minute disk element of the cutting edge

Fig.2 Extraction of removal voxels in our new simulator for each minute tool rotational angle analysis<sup>11)</sup>

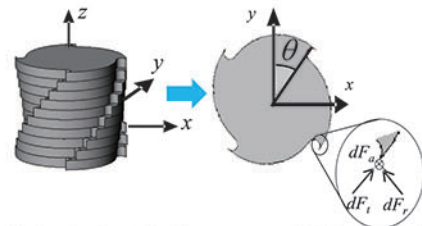


Fig.3 Tool model of instantaneous rigid force model<sup>11)</sup>

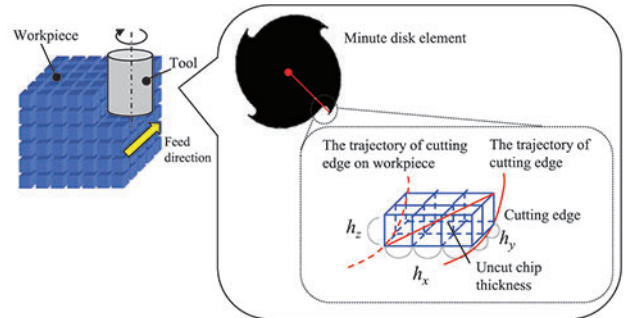


Fig.4 Geometric relationship between the removal voxels and the each axis component  $h_x$ ,  $h_y$ , and  $h_z$  of uncut chip thickness

ここで、 $K_{te}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{ae}$ ,  $K_{te}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{ae}$ は予備実験から得られる切削係数であり、 $h(\theta, z)$ は工具半径方向の実切込み厚さ、 $dz$ は工具軸方向に分割した微小薄板要素の厚さである。つまり、工具半径方向の実切込み厚さ $h(\theta, z)$ が求められれば、切削力を算出することができる。

各微小薄板要素における工具切れ刃ベクトルでの各軸方向の干渉量(実切込み厚さの各軸成分)は、図4に示すように除去対象ボクセルの個数とボクセルの1辺の長さの積から計算できる。実切込み厚さ $h(\theta, z)$ は、x方向成分 $h_x$ とy方向成分 $h_y$ 、z方向成分 $h_z$ を用いて次式で表すことができる。

$$h(\theta, z) = \sqrt{h_x(\theta, z)^2 + h_y(\theta, z)^2 + h_z(\theta, z)^2} \quad (4)$$

### 3. 工具系の弾性変形の予測

著者らはボクセルモデルを用いた微小時間および微小空間分解能での切削力シミュレーションを用いることで、加工中に発生する切削力から工具系の変形量を算出して、その変形量に従って変化する実切込み厚さの変化を考慮した切削シミュレーション技術を開発している<sup>12)</sup>。本技術により、加工中のエンドミルのたわみによる変形、工具および工具ホルダ把持部での水平方向の変形および傾斜方向の変形を予測することが可能となる。

エンドミルのたわみによる変形は、図5に示すように、分布荷重が作用する片持ちはりの変形として計算することができる。本研究では工具を工具軸方向に垂直な平面で分割した微小薄板要素ごとの工具切れ刃に作用する切削力を算出し、各微小薄板要素における変形量を求める。例えば、図5に示すように工具に $P_1 \sim P_3$ の荷重が加わっている場合、荷重 $P_i$ が加わっている位置での変形量 $w_i$ は重ね合わせの原理により次式で算出することができる。ここで、 $E$ は工具材料のヤング率、 $I$ は断面二次モーメント、 $a_{il}$ は工具先端から荷重 $P_i$ が作用する点までの距離、 $b_{il}$ は工具把持部から荷重 $P_i$ が作用する点までの距離を表す。また、 $z_i$ は変形量を求める微小薄板要素の工具先端からの距離を表す。



$$v_i = \sum_{i=1}^3 \left( -\frac{P_i b_i^2}{2EI} z_i + \frac{P_i b_i^2 (3a_i + 2b_i)}{6EI} \right) \quad (5)$$

工具および工具ホルダ把持部での並進方向の変形は、図6に示すように把持部での構造部分での横方向の剛性によって、その変形量と力の関係はフックの法則で表現することができる。工具先端に並進方向に作用する力を $F$ とし、工具と工具ホルダ間のばね剛性を $K_h$ とし、工具と工具ホルダ間の並進方向の変形量を $\delta_h$ とすると、変形量と力の関係は次式で表される。

$$F = K_h \times \delta_h \quad (6)$$

同様に、工具ホルダと主軸間のばね剛性を $K_s$ とし、工具ホルダと主軸間の並進方向の変形量を $\delta_s$ とすると、変形量と力の関係は次式で表される。

$$F = K_s \times \delta_s \quad (7)$$

次に、工具および工具ホルダ把持部での傾斜方向の変形は、図6に示すように把持部での構造部分の傾斜により発生し、その変形量とトルクの関係は単純ねじりで表現することができる。工具と工具ホルダ間に作用するトルクを $T_h$ とし、工具と工具ホルダ間のねじり剛性を $R_h$ とし、工具の傾斜量を $\phi_h$ とすると、傾斜量とトルクの関係は次式で表される。

$$T_h = R_h \times \phi_h \quad (8)$$

同様に、工具ホルダと主軸間のねじり剛性を $R_s$ とし、工具ホルダの傾斜量を $\phi_s$ とすると、傾斜量とトルクの関係は次式で表される。

$$T_s = R_s \times \phi_s \quad (9)$$

ここで、工具ホルダと主軸間のばね剛性やねじり剛性は主軸の回転の有無や回転数の大小により変化するが<sup>18)</sup>、本研究では工具系の弾性変形の予測モデルを簡略にするために、ばね剛性やねじり剛性は主軸の状態に依らず一定としている。工具系の弾性変形の予測では、上述した工具系の変形量によって変化する実切込み厚さを考慮して、解析を行っている。工具系の弾性変形を考慮して算出される実切込み厚さによって算出される切削力と、工具系の弾性変形を生じさせている切削力とがつり合うように工具系の変形量を決定している。

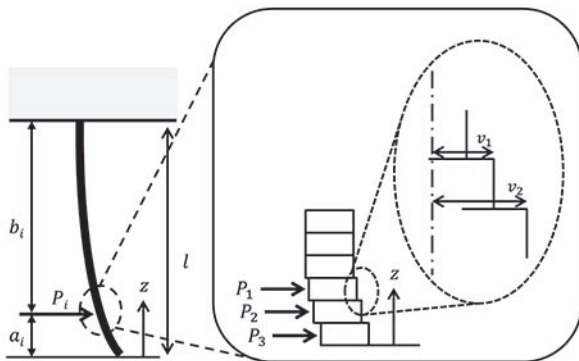


Fig.5 Tool Deflection calculated from the cutting force of each minute disk element

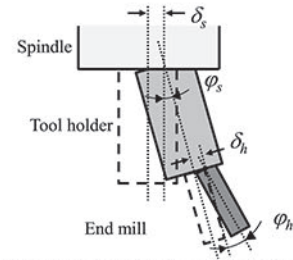


Fig.6 Elastic deflection model in translation and rotation direction

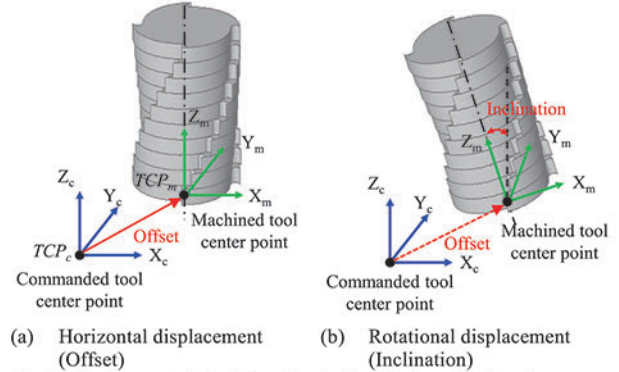


Fig.7 Displacement derived from the elastic deflection of tool system

#### 4. 工具系の弾性変形の予測結果に基づく加工誤差補正方法

本研究では、前述した工具系の弾性変形の予測結果に基づき、仕上げ面に転写される工具系の弾性変形による加工誤差を補正する方法を提案する。まず、工具系の弾性変形が影響を及ぼす仕上げ面の加工誤差は図7に示すような工具系の水平方向の変位(Offset)と工具系の傾斜方向の変位(Inclination)に分類できる。本研究では、加工中の切削力によって生じる工具系の弾性変形によるこれらの加工誤差を補正して、高精度加工を実現する。補正方法としては、工具位置および姿勢の修正によって行うが、これらが変わると、実切込み厚さが変化するため、工具系の変形量もそれに従って変化する。本研究では、ボクセルモデルを用いた微小時間領域での解析を行うことで、工具1刃当たりの送り量ごとに実切込み厚さの変化を考慮した工具系の弾性変形を予測し、それに基づき工具位置および姿勢の修正を行い、加工誤差を補正することを可能にした。

加工誤差の補正では、まず加工中の切削力を予測し、予測した切削力から工具系の変形量を算出する。算出した工具系の変形量から工具系の水平方向の変位(Offset)と工具系の傾斜方向の変位(Inclination)を求める。Offsetは工具指令での工具先端点 $TCP_c$ と工具系の変形量を考慮して算出される工具先端点 $TCP_m$ とを結ぶベクトルとなる。Inclinationは工具軸ベクトル $Z_c$ と工具系の変形量を考慮して算出される工具軸ベクトル $Z_m$ から算出できる。ここで、工具のたわみは非線形な変形であるが、非線形な変形を補正することは困難であるため、本研究では、工具軸ベクトルでInclinationを求める。図8に示すように上記で求めるOffsetおよびInclinationが最小となるように工具指令で工具位置および姿勢を修正して、加工誤差を補正する。このとき、工具位置および姿勢を修正すると、実切込み厚さが変化するため、切削力が変化する。このとき、工具系の変形量も変化する、工具位置および姿勢を一度修正



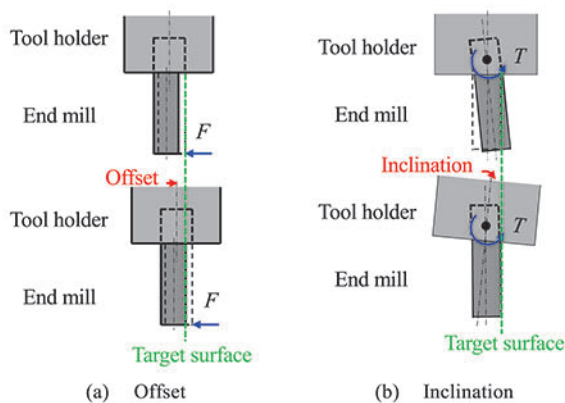


Fig.8 Correction of the displacement derived from the elastic deflection of tool system

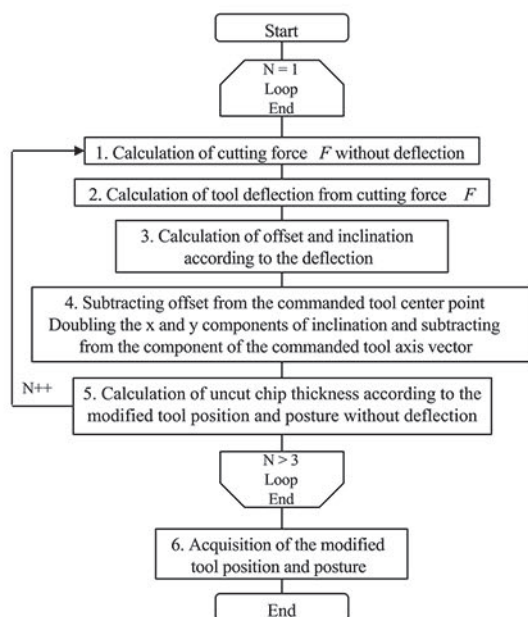


Fig.9 Flowchart to calculate the tool position and posture according to the predicted elastic deflection of tool system

するだけでは、加工誤差を正しく補正することができない。そのため、OffsetおよびInclinationが最小となるまで繰り返し計算を行い、修正する工具位置および姿勢を決定する。修正する工具位置および姿勢を決定する処理のフローチャートを図9に示す。解析手順の詳細を以下に示す。

1. 工具系を剛体とみなして、いったん変形量を無視して切削力を算出する。
2. 切削力から工具系の変形量を算出する。
3. 算出した工具系の変形量からOffsetおよびInclinationを算出する。
4. 算出したOffsetを工具指令位置から減じて、工具位置を修正する。また、算出したInclinationのx方向成分およびy方向成分を2倍して工具指令での工具軸ベクトルのそれらの値から減ずることで、工具姿勢を修正する。（万が一工具の変形量が同じであれば、補正後の加工時には工具が変形したときの工具軸が工具指令での工具軸ベクトルと同じとなるように工具姿勢を修正する。）
5. 工具位置および姿勢を修正すると、実切込み厚さが変化する。そのため、一度の修正では、加工誤差を正しく予測することができない。そこで、修正した工具位置および姿勢で工具を

Table 1 Cutting condition and cutting force simulation condition

Machine tool		NMV1500DCG
Workpiece	Material	C3604
	Tool type	Square end mill
Cutting tool	Material	HSS-Co
	Helix angle	30 °
	Number of flutes	4
	Diameter	6.0 mm
Cutting conditions	Cutting direction	Up cut, Down cut
	Axial depth of cut	5.0 mm
	Radial depth of cut	2.0 mm
	Spindle speed	2000 min <sup>-1</sup>
	Feed rate	480 mm/min
Disk element thickness		0.050 mm
Minimum voxel size		0.050 mm

Table 2 Determined cutting coefficients

Cutting coefficients	$K_{te}$	10.3 N/mm
	$K_{tc}$	965.2 N/mm
	$K_{re}$	10.3 N/mm
	$K_{rc}$	223.9 N/mm <sup>2</sup>
	$K_{ae}$	0.8 N/mm <sup>2</sup>
	$K_{ac}$	282.7 N/mm <sup>2</sup>

Table 3 Determined spring constant and torsional rigidity

Tool – Tool holder	Spring constant $K_h$	7587 N/mm
	Torsional rigidity $R_h$	5735 Nm/rad
Tool holder – Spindle	Spring constant $K_s$	26884 N/mm
	Torsional rigidity $R_s$	79492 Nm/rad

剛体とみなして、改めて実切込み厚さを算出する。

修正した工具位置および姿勢で算出した実切込み厚さから、再度手順1から手順5を繰り返すことで、加工誤差と修正する工具位置および姿勢を矛盾なく計算することができる。繰り返し数を多くすると、計算の精度は改善されるが解析時間も長くなるため、本研究では、繰り返し数を3回として解析を行った。

## 5. 実加工による検証

提案した加工誤差補正方法の有効性を検証するためにスクエアエンドミルを用いた切削加工実験を行い、提案した方法による工具位置および姿勢の修正により、加工面の加工誤差が効果的に低減できることを検証した。このため、工具位置および姿勢の修正を行った場合と修正を行わない場合の加工面の断面形状をそれぞれ比較した。切削条件および切削シミュレーション条件を表1に示す。実験では5軸立て形マシニングセンタ（DMG森精機 NWV1500 DCG）を用いて切削加工を行い、加工後の形状を三次元形状測定機（KEYENCE VR-3000）で測定した。本実験で用いた5軸立て形マシニングセンタでは旋回軸によって変更できる最小値は0.001 deg.であり、工具姿勢の補正量の最小値より十分に小さい。

切削シミュレーションでの切削力の予測に必要な切削係数を予備実験により決定し、決定した切削係数を表2に示す。本研究では、スクエアエンドミルのたわみを予測するために必要な曲げ剛性  $EI$  は、ヤング率  $E$  は使用する工具の材質から 220 GPa と決定し、断面二次モーメント  $I$  は仙波ら<sup>19)</sup>の先行研究を参考にして、使用する工具の刃先円の径に等しい円柱の 56%として決定した。

また、工具系の弾性変形を予測するために必要な工具および工具ホルダ把持部のばね剛性およびねじり剛性は、荷重変位試験を行って決定した。決定したばね剛性およびねじり剛性を表3に示す。予備実験によって決定したこれらのパラメータを用いて提案した方法により工具系の変形量を予測し、その変形



量に基づいた工具位置および姿勢を工具 1 刃当たりの送り量ごとに修正して加工実験を行った。

図 10 にアップカットで加工した場合の結果を示す。図 10(a)に工具位置および姿勢を修正しない場合での実加工面の形状とシミュレーションで予測した加工面の形状を比較して示す。図 10(b)に工具位置および姿勢を修正した場合での実加工面の形状とシミュレーションで予測した加工面の形状を比較して示す。また、図 10(c)に、各加工断面の表面形状の測定結果について、工具位置および姿勢を修正しない場合と修正する場合とを比較して示す。さらに、図 10(d)に加工面に大きく影響を及ぼす Y 軸方向の工具位置の補正量を代表して示す。図 10(a)の工具位置および姿勢を修正し

ない場合でのシミュレーション結果では工具系の弾性変形の影響が加工面に現れていることがわかる。本研究で提案した方法によって、工具系の変形量に基づいて工具位置および姿勢を修正して加工した図 10(b)の結果では、工具系の変形の補正が行われ、加工面の加工誤差が改善されていることがわかる。三次元形状測定機によって測定した加工断面の表面形状の結果を示した図 10(c)では、工具位置および姿勢を修正しない場合では、加工誤差が最大 500  $\mu\text{m}$  程度存在していたのに対して、工具位置および姿勢を修正する場合では、加工誤差は最大 100  $\mu\text{m}$  程度となっていることがわかる。Y 軸方向の工具位置の補正量の結果を示した図 10(d)では、工具の入口部および出口部の過渡的な状態でも工具

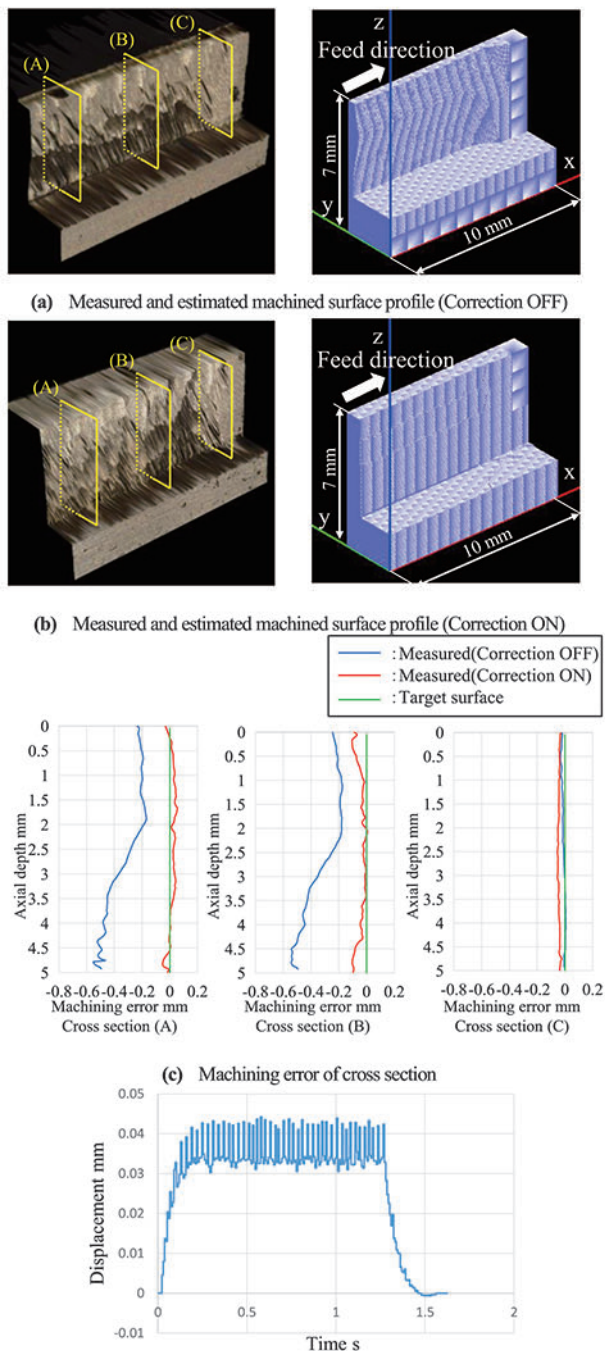


Fig.10 Machining error reduction after predicted error correction (Up cut milling)

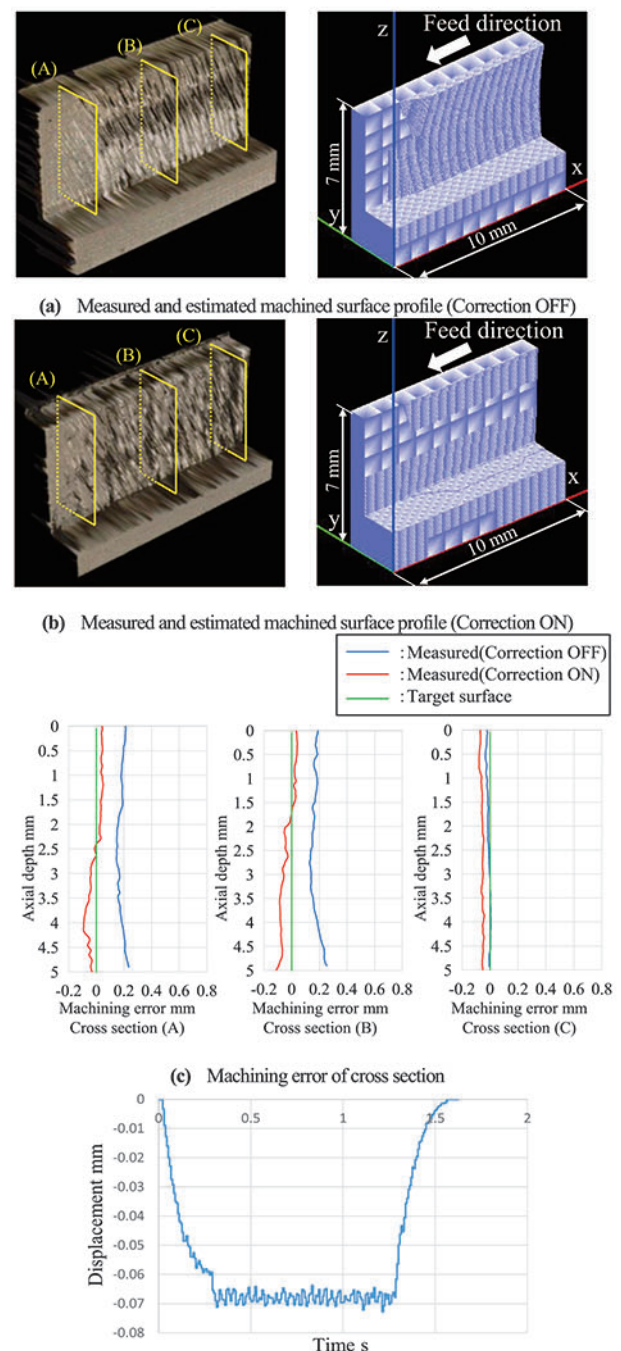


Fig.11 Machining error reduction after predicted error correction (Down cut milling)



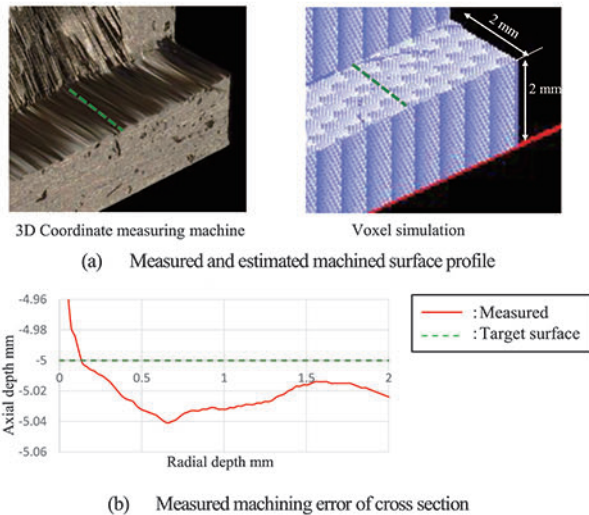


Fig.12 Machining error of bottom machined surface (Up cut milling)

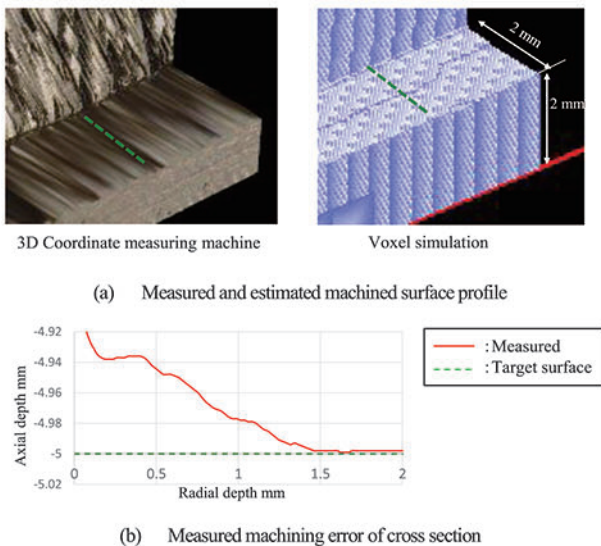


Fig.13 Machining error of bottom machined surface (Down cut milling)

の変形量に従って補正量が算出できていることがわかる。同様に、図 11 にダウンカットで加工した場合の結果を示す。図 11(a)に工具位置および姿勢を修正しない場合での実加工面の形状とシミュレーションで予測した加工面の形状を比較して示す。図 11(b)に工具位置および姿勢を修正した場合での実加工面の形状とシミュレーションで予測した加工面の形状を比較して示す。また、図 11(c)に、各加工断面の表面形状の測定結果について、工具位置および姿勢を修正しない場合と修正する場合とを比較して示す。さらに、図 11(d)に加工面に大きく影響を及ぼす Y 軸方向の工具位置の補正量を代表して示す。ダウンカットで加工した場合でも、本研究で提案した方法によって加工誤差が改善されていることがわかる。三次元形状測定機によって測定した加工断面の表面形状の結果を示した図 11(c)では、工具位置および姿勢を修正しない場合では、加工誤差が最大 250  $\mu\text{m}$  程度存在していたのに対して、工具位置および姿勢を修正する場合には、加工誤差は最大 100  $\mu\text{m}$  程度となっていることがわかる。Y 軸方向の工具位置の補正量の結果を示した図 11(d)では、工具の入口部および出口部の過渡的な状態でも工具の変形量に従って補正量が算出できていることがわかる。

以上の実験結果から、本研究で提案する方法によって工具系の弾性変形に起因する加工誤差を効果的に低減することが可能であることがわかったが、スクエアエンドミル加工では工具を傾斜させることによって工具底刃で被削材を切削してしまい、加工誤差が発生している。工具底刃での切削による加工誤差を図 12(アップカット)および図 13(ダウンカット)に示す。アップカットの条件において、工具姿勢を修正した場合には、三次元形状測定機による測定結果では最大で 40  $\mu\text{m}$  の誤差が生じていることがわかる。シミュレーション結果でも、ボクセル 1 個分(50  $\mu\text{m}$ )の誤差が生じていることがわかる。また、ダウンカットの条件において、工具姿勢を修正した場合には、測定結果では最大で 60  $\mu\text{m}$  の誤差が生じていることがわかる。シミュレーション結果でも、ボクセル 1 個分(50  $\mu\text{m}$ )の誤差が生じていることがわかる。以上のように、スクエアエンドミル加工においては、工具底刃の切削による加工誤差が生じるが、工具系の弾性変形による加工誤差が本検証では最大 500  $\mu\text{m}$  程度であるのに対して、50  $\mu\text{m}$  程度と小さいことから、本研究で提案した方法による加工誤差の補正は有効であることがいえる。

以上のことから、本研究で提案した工具系の弾性変形の予測結果に基づく工具位置および姿勢の修正によって、加工誤差を低減できることが確認できた。

## 6. 結 言

本研究では、ボクセルモデルによる切削シミュレーションを拡張した工具系の弾性変形のシミュレーションを用いて、予測した工具系の変形量に基づく、加工誤差補正方法を提案した。また、加工実験でその有効性を検証して、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 工具系の弾性変形の予測結果に基づいて、工具位置および姿勢を修正することによって、実際の加工面の加工誤差を低減できる。
- (2) スクエアエンドミル加工においては、工具姿勢を変更することによって、工具底刃での切削が生じ新たな加工誤差が生じるが、その誤差は工具系の変形量より小さい。

以上のことから、本研究で提案した方法による加工誤差の低減は有効である。本研究で開発した方法は、エンドミル加工において加工効率を低下させることなく高精度加工を実現するための有用なツールになるものと考えられる。今後、曲面加工などの複雑形状の加工において、本手法による高精度加工が実現可能かどうかの検証を進める予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は JSPS 科学研究費基盤研究(B) JP17H03158、三豊科学技術振興協会(MAST)、兵庫県科学技術振興財団、工作機械技術振興財団の助成を受けて行われました。切削加工実験に使用した 5 軸立て形マシニングセンタは MTTRF より貸与されました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) J.Thusty et al.: Dynamics of Cutting Forces in End Milling, CIRP Annals, **24**, 1 (1975) 21.
- 2) D.Mongomery et al.: Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, J. of Eng. for industry, **113**, 2 (1991) 21.
- 3) Y.Altintas et al.: A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills, CIRP Annals, **45**, 1 (1996) 59.

- 4) K.Shirase et al.: Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills, *Int. J of Machine Tools and Manufacture*, **36**, 5 (1996) 567.
- 5) 中本 圭一 他: ボクセルモデルを用いたヴァーチャルマシニングシミュレータの開発, *精密工学会誌*, **74**, 12 (2008) 1308.
- 6) 長谷川 輝人 他: 被削材のボクセルモデルを用いたエンドミル加工の切削力シミュレーションと切削力の予測結果に基づく適応制御, *精密工学会誌*, **82**, 5 (2016) 467.
- 7) 土棚善貴 他: Voxel 表現に基づく多軸制御加工切削シミュレーションの大規模並列処理手法, *79*, 5 (2013) 467.
- 8) 岸波建史 他: Voxel 表現法の機械加工シミュレータへの応用, *精密工学会誌*, **55**, 1 (1989) 105.
- 9) Balasuabramaniam M. et al.: Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation, *Computer-Aided Design*, **32**, 4 (2000) 261.
- 10) Hauth S. et al.: Extended linked voxel structure for point-to-mesh distance computation and its application to NC collision detection, *Computer-Aided Design*, **41**, 12 (2009) 896.
- 11) 西田勇 他: ボクセルモデルを用いた切削シミュレーションにおける微小時間および微小空間解析の高速処理手法, *精密工学会誌*, **84**, 2, (2018) 175.
- 12) 西田勇 他: 工具系の弾性変形を考慮したボクセルモデルによるエンドミル加工シミュレーション, *精密工学会誌*, **84**, 6, (2018) 572.
- 13) 成田浩久 他: 予測シミュレータを利用したボールエンドミル加工のトライレス化の試み: 第 1 報, 加工工程予測システムの開発, *日本機械学会論文集 C 編*, **71**, 712, (2005) 3622.
- 14) K .Shirase et al.: Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills, *Int. J. Machine Tools Manufacturing*, **36**, 5 (1996) 567.S
- 15) D. Montgomery et al: Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, *Journal of Engineering for Industry*, **113**, 2 (1991) 160.
- 16) Y. Altintas et al: A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills, *CIRP Annals*, **45**, 1 (1996) 59.
- 17) 成田浩久 他: ヴァーチャルマシニングシミュレータを用いた NC プログラムの評価と修正, *日本機械学会論文集(C 編)*, **66**, 648 (2000) 2871.
- 18) A.Matsubara et al.: Evaluation of dynamic stiffness of machine tool spindle by non-contact excitation tests, *CIRP Annals*, **64**, 1 (2015) 365.
- 19) 仙波卓弥 他: 高剛性仕上げエンドミルの開発とその性能評価, *日本機械学会論文集(C 編)*, **55**, 511 (1989) 787.