多軸制御超精密切削加工の高能率化に向けた セッティング誤差補正手法の開発*

田中 匠太郎** 馬場 慎之佑** 中本 圭一*** 竹内 芳美†

Development of a Compensation Method of Setting Errors for High Efficient Multi-axis Control Ultraprecision Machining

Shotaro TANAKA, Shinnosuke BABA, Keiichi NAKAMOTO and Yoshimi TAKEUCHI

Initial tool setting errors that could be generated while setting a cutting tool deteriorates machining accuracy. However, it is difficult to prevent an occurrence of the tool setting errors due to the manual setting process, which may increase in accordance with the number of the control axes. These errors make it difficult to locate tool control points at the right position while machining. Therefore, this study aims at detecting and compensating the setting errors without depending on operator's skill. A novel setting errors compensation method is proposed based on form shaping theory by using a dummy work and an on-machine measurement device. It is expected that the tool setting errors are compensated with high accuracy and efficiency because of automatic detection of the actual tool control points. From the conducted experiments, it is found that the proposed method has a potential to compensate the tool setting errors accurately and to achieve high efficient multi-axis control ultraprecision machining.

Key words: ultraprecision machining, multi-axis control, setting error, on-machine measurement, form shaping theory

1. 緒 言

優れた光学性能を得るために自由曲面上に微細形状を有した光学部品などの需要が高まっている¹⁾。このような複雑で微細な3次元形状を創成する加工法として超精密切削加工には優位性があるものの^{2,3)}、使用する加工機の位置決めや工具形状の誤差、加工条件、環境などの非常にわずかな変動であっても加工精度に大きな影響を与える。特に多軸制御時には、工具や被削材の取付け時に発生する相対的な位置決め誤差（以下、セッティング誤差）の影響が支配的であり、高い分解能を有した加工機本来の性能は十分に発揮できていない。

セッティング誤差に関しては、工具と被削材間の接触力や電圧印加時の電流変化などから0.1~1 μm程度の精度で位置決めする手法が既に考案されている⁴⁾。これらは基本的に工具と被削材間の距離のみを対象としているのに対し、著者らは試し削りした加工痕から検出したセッティング誤差を、NCデータの修正によって補正して同時多軸制御時においても数 μm 以内の誤差で高精度な加工が達成できることを示してきた^{5,6)}。一方、これまでに提案した手法では試し削りを施した被削材を加工機から取り外して加工痕を計測する時間と手間を要し、非効率で改善の余地があった。

そこで本研究では、超精密切削加工の高能率化に向けて、試し削り用被削材を用いる新たなセッティング誤差補正手法を開発し、多軸制御時のセッティング誤差を効果的に検出できる形状創成理論に基づいた試し削り溝も考案する。また、接触式の機上計測機を用いてセッティング誤差を機上で検出して補正できるようにし、セッティング誤差補正の自動化を目指す。これら提案する誤差補正手法は、マイクロ溝や3次元複雑形状などの多軸制御加工により有効性を検証する。

2. 使用する加工機および計測機

本研究では超精密5軸制御加工機 FANUC ROBOnano Ui を用いる。本加工機はX, Y, Zの並進3軸とB, Cの回転2軸から構成されており、各軸の分解能は並進軸 1 nm, 回転軸 0.00001°である。加工機の構造と発生するセッティング誤差の例を図1に示すが、回転軸と並進軸の直角度などの幾何誤差はセッティング誤差に比べて十分に小さく、加工精度に与える影響は無視できるものとする。

本加工機で多軸制御加工する際には、工具制御点と各回転軸と完全に一致していることを前提としてNCデータを生成する。従って、加工精度に大きく影響するセッティング誤差の主要因は以下の3つである。

- (i) 工具制御点とC軸回転中心の不一致
- (ii) 工具制御点とB軸回転中心の不一致
- (iii) Y軸原点（切込み原点）の不一致

これらの要因で生じるセッティング誤差は、NCデータの修正により補正が容易であることから、本研究ではこのセッティング誤差補正について扱う。なお本加工機では、B軸テーブル上にA軸モータを取り付けることで6軸制御加工も可能であり、この場合には工具制御点とA軸回転中心の不一致も含めて補正する必要がある。

Fig. 1 Multi-axis control ultraprecision machining center

* 原稿受付 平成 28 年 2 月 15 日

掲載決定 平成 28 年 4 月 19 日

** 学生会員 東京農工大学（東京都小金井市中町 2-24-16）

*** 正 会 員 東京農工大学大学院（同 上）

† 正 会 員 中部大学（愛知県春日井市松本町 1200）

Fig. 2 Dummy work for trial cutting to detect setting errors

Fig. 3 Grooving for setting errors detection against C axis

Fig. 4 Grooving for setting errors detection against B axis

機上でセッティング誤差を検出する際には、接触式の机上計測機 FANUC NANOCHECKER を用いる。この計測機は、先端が球体となっているプローブを測定対象に接触させながら最小分解能 1 nm でプローブ軸方向の変位を計測できる。計測機は B 軸テーブル上に設置し、プローブの測定位置を加工機の駆動軸を用いて NC 制御する。工具スピンドルを並べて設置することで、C 軸テーブル側に被削材を固定して同一機上で計測と加工を行うことが可能である。

3. 試し削り用被削材を用いた誤差補正

3.1 誤差補正手順

これまでに提案したセッティング誤差補正手法は大きく分けて 3 つの手順からなる⁵⁾。まず、試し削りとして被削材に単純形状を構成する溝を加工する。次に、この加工痕を測定して実際の工具制御点の位置から理想的な工具制御点である回転軸中心までの距離を求め、セッティング誤差を検出する。最後に、セッティング誤差を補正するように NC データを修正する。

一方、本研究では試し削り用被削材（以下、ダミーワーク）を用いた新たな誤差補正手法を提案する。ここではまず加工機に被削材を取り付け、回転工具を用いて平面出しを行う。その後、図 2 に示すように被削材の上方を覆うようにダミーワークをジグに設置し、ジグをテーブルへ固定する。ダミーワークにも同様に平面出しを行い、2 つの平面の相対距離を加工機の機械座標から算出する。実際の工具制御点は、ダミーワークを取り外し、試し削りで施した溝を高分解能のレーザ顕微鏡で測定して検出する。このため、被削材が硬脆材料の場合でもダミーワークを転写性の良好な材料とすることで工具の負担が抑えられる。また、従来手法で問題となっていた被削材の取付け、取外しに伴うセッティング誤差の再発生も避けられる。

回転テーブル側へ工具を取り付ける場合、手作業で工具制御点と回転軸中心を一致させることは一般に困難である。このため、(i) 工具制御点と C 軸回転中心の不一致が生じ、実際の工具制御点は C 軸の回転に伴って XY 平面内を移動する。そこで、C 軸回転中心 O_c から見た工具制御点 $O_{t0}(x_c, y_c)$ を試し削りにより

Fig. 5 Target shape of multi-axis control grooving

Fig. 6 Machined results of 5-axis control grooving

検出する。ここで、図 3 に示すように、C 軸の角度を変化させて並行した 3 本の溝を加工する。C 軸を θ_1 傾けた工具制御点 $O_{t\theta_1}$ は C 軸回転中心周りの回転運動であるため、 $(x_c \cos \theta_1 - y_c \sin \theta_1, x_c \sin \theta_1 + y_c \cos \theta_1)$ と表すことができる。C = 0° で加工した溝深さを D 、C = θ_1 で加工した溝深さを D_1 とすると、 O_{t0} と $O_{t\theta_1}$ の Y 座標の差と D 、 D_1 の差が等しくなることから、次式が成立する。

$$D_1 - D = x_c \sin \theta_1 + y_c \cos \theta_1 - y_c \quad (1)$$

また、C = θ_2 のときの溝深さの測定値を D_2 とすると、 D と D_2 の関係も同様に次式で表すことができる。

$$D_2 - D = x_c \sin \theta_2 + y_c \cos \theta_2 - y_c \quad (2)$$

式(1)および(2)を x_c 、 y_c について解くことにより、実際の工具制御点 $O_{t0}(x_c, y_c)$ の座標値を求めることができる。

以上で得られた工具制御点と C 軸回転中心の距離をキャンセルするように、NC データを修正して誤差を補正する。すなわち、修正前の NC データの X 軸、Y 軸の座標値がそれぞれ X 、 Y であったとき、以下のように NC データを書き換える。

$$X \rightarrow X + (x_c \cos \theta - y_c \sin \theta - x_c) \quad (3)$$

$$Y \rightarrow Y + (x_c \sin \theta + y_c \cos \theta - y_c) \quad (4)$$

同様に、(ii) 工具制御点と B 軸回転中心の不一致を解消するために、図 4 に示す Z 軸に平行な溝と、X 軸に平行な溝をダミーワーク上に加工する。その後、B 軸を 180° 回転させこれを繰り返し、直交する溝間の距離 dx 、 dz を測定することで実際の工具制御点を算出する。これと回転中心までの距離をキャンセルするように NC データを修正することで誤差を補正する。

さらに、(iii) Y 軸原点（切込み原点）については、試し削りの前に平面出しを行った際に、機械座標より被削材表面とダミーワーク表面の相対距離を算出しておく。その後、ダミーワークに施した試し削りから、実際の溝深さと目標切込み深さとの差を求める。この結果と相対距離を考慮して切込み原点と実際の工具制御点との差を求め、NC データを修正してセッティング誤差を補正する。

Table 1 Measured depths of machined grooves

C axis	Groove depth μm	
	Without compensation	With compensation
-15	32.40	4.27
0	2.67	2.84
15	11.12	5.51

Fig. 7 Multi-control machining of snow crystal shape

3.2 多軸制御マイクロ溝加工による検証

複数の並進軸・回転軸を駆動させながら加工する多軸同時制御加工で本手法の有効性を検証した。目標形状を図5に示す。この形状はB軸回転中心を通過する半径400 μm の半円状の溝を4つ組み合わせて構成されている。従って非回転工具でB軸の回転角度を変えながら曲線加工する際には、すくい面と切削方向が直交するように各軸を同時制御する必要がある。ここで、各円弧の開始点ではC = -15°または15°となるようにC軸の回転角度を変えながら曲線加工している。被削材、ダミーワークともに同じ真鍮を使用し、工具には刃先角度60°、すくい角0°、逃げ角0°の単結晶ダイヤモンドバイトを用いた。目標の切込み深さは3 μm とし、セッティング誤差の補正の有無で加工結果を比較した。なお、セッティング誤差となるB軸回転中心 O_B から見た工具制御点 (x_B, z_B) は(674.81, 730.08) μm 、C軸回転中心 O_C から見た工具制御点 (x_C, y_C) は(41.11, -560.25) μm と検出された。

ここで、工具制御点とC軸回転中心のセッティング誤差が補正できていない場合、溝の深さは一定にならない。また、工具制御点とB軸回転中心の誤差が補正できていない場合には、4つの半円が一点では交わらない。加工結果を図6に示すが、補正無しでは加工痕が観察されなかった箇所や切込みが深くなっている箇所があり、目標形状と大きく異なる形状となった。一方、補正有りでは目標に近い形状が加工できている。表1に半円の両端と中央での溝深さの一例を示すが、目標切込み深さの3 μm に対して、提案するダミーワークを用いたセッティング誤差補正手法によって加工精度が大幅に向上していることが分かる。

3.3 多軸制御マイクロ溝加工による検証

前節では、ダミーワークを用いたセッティング誤差補正手法の有効性を確認した。そこで、さらに微細な機械部品を想定したマイクロ複雑形状を多軸制御によって加工した。図7に目標形状と加工結果を示す。原寸大の雪の結晶を模した形状であり、全てのセッティング誤差が適切に補正されていないと加工が困難である。直径は640 μm で、中心と端で40 μm の高低差があり、曲面上にはその勾配に沿うように深さ5 μm の溝加工を施している。工具は前節と同じダイヤモンドバイトを用いた。ダミーワークには真鍮、被削材にはアルミニウム合金を用いたが、これは以降の実験でも同様である。提案手法によりセッティング誤差が補正され、目標形状通りの加工ができており、マイクロ複雑形状の超精密切削加工が達成できることが確認できた。

Fig. 8 Influence of setting errors on tool control point according to C axis rotation

4. 形状創成理論に基づく試し削り溝

4.1 形状創成理論による誤差解析

これまで経験的に得られた加工痕を測定してセッティング誤差を補正していたが、この試し削り溝には理論的裏付けがなく、試行錯誤的に決められていたため、セッティング誤差が十分に検出できていない可能性があった。そこで、工作機械の創成運動に関する数学モデル、すなわち工作機械の形状創成理論^{8)・10)}を用いてセッティング誤差が創成運動に与える影響を解析することで、セッティング誤差を効果的に検出できる条件を求め、新たな試し削り溝を考案する。

ここではまず、工作機械を工作物から始まり各構成要素を経て工具で終わる剛体の連鎖と考え、形状創成運動を各要素間の相対運動の重畳と考える。また、剛体の運動は6自由度であるため、相対運動を工作機械の座標軸X, Y, Zではそれぞれ1~3、各座標軸周りの回転運動A, B, Cではそれぞれ4~6とする。以上から、工作機械構成要素の連鎖の順に並べた機構コード k を用いると、6軸制御加工時の図1の加工機は次式で表される。

$$k = 63125 \quad (5)$$

この連鎖において各要素間の相対運動に対応した同次座標変換を順次行うことで、工具座標系における工具の位置ベクトル r_t は工作物座標系に変換される。つまり、対象とする加工機の創成運動は以下のように表すことができる。

$$r_w = A^6 A^3 A^1 A^2 A^5 r_t \quad (6)$$

ここで r_w は工作物座標系における工具の位置ベクトル、 $A^j (j=1 \sim 6)$ は各相対運動に対応する座標変換行列である。

式(6)に各回転軸の回転角度0° ~ 360°を代入して誤差検出に適した条件を求める。C軸回転中心と工具制御点間のセッティング

Fig. 11 Machined results of 6-axis control grooving

Fig. 12 Measured results of 6-axis control grooving

誤差のX成分 x_c とY成分 y_c が、創成運動時の工具制御点の位置決め誤差として現れる割合を例として図8に示す。同図(a)から $C = 0^\circ$ あるいは 180° であれば工具制御点には x_c が $\pm 100\%$ 影響し、 y_c はX方向へ全く関わらないため、これらの角度が x_c の検出には適していることが分かる。同様に同図(b)では $C = 0^\circ$ あるいは 180° が y_c の検出に適していることが分かる。他の回転軸についても計算すると、 $A = 0^\circ$ あるいは 180° 、 $B = -25^\circ$ 、 0° あるいは 25° 、 $C = 0^\circ$ あるいは 180° が誤差検出に適した角度となる。

以上の角度を考慮し、図9に示した試し削り溝を考案した。このとき図に示す角度以外は、全ての回転軸を機械原点(O)で加工することで、それぞれの溝には一つの要因のみが反映する。

Fig. 13 Machine structure with on-machine measurement device

Fig. 14 Groove depths measured with on-machine measurement device

4.2 試し削り溝の検証

提案した試し削り溝が誤差検出に適していることを検証するため、形状創成理論を用いて誤差検出に適していないと算出された条件との加工結果を比較した。誤差検出に不適切な角度 A 、 $C = 30^\circ$ あるいは 60° では、複数の誤差要因の影響を受け、加工痕からセッティング誤差を正確に検出することは難しい。しかし、非回転工具のすくい面の向きを考慮すると提案した溝の加工は困難なため、図10の試し削り溝を比較に用いた。2つの試し削り溝を同じダミーワークに加工し、それぞれで検出されたセッティング誤差を補正した。その後、図5に示した半円状の溝を4つ組み合わせた形状を半径 $800\mu\text{m}$ に拡大し、さらに半径 24mm の球面上に目標切込み深さ $10\mu\text{m}$ 、切削速度 10mm/min で加工した。このとき、球面の法線方向に一定の溝断面となるように、同時6軸制御加工によって図11の加工結果を得た。

4つの半円が1点で交わる箇所での誤差のX成分 dx 、Y成分 dy 、および半円の始点a、中間点b、終点cにおける溝深さをレーザ顕微鏡で測定した結果を図12に示す。提案した試し削り溝では、目標形状に対して $\pm 1\mu\text{m}$ 以内で溝の交点や深さが得られおり、比較した図10の試し削り溝よりも大幅に加工精度が向上していることが分かる。この結果、形状創成理論による誤差解析から提案した試し削り溝により、セッティング誤差を精度良く検出して補正でき、セッティング誤差の創成運動への影響を効果的に低減できることが確認できた。

5. 機上計測機を用いた誤差補正の自動化

5.1 機上計測機を用いた補正

本研究ではダミーワークを用いてセッティング誤差を補正し、被削材の取付け、取外しを省くことができた。しかしながら、試し削り溝は別途レーザ顕微鏡などで測定する必要があった。そこで、機上計測機を用いたセッティング誤差の検出と補正の自動化による超精密切削加工の高能率化を目指した。機上計測機を使用する際には、図13に示すようにB軸テーブルに工具主軸と機上計測機を、C軸テーブルに被削材およびダミーワークを設置する。このとき、工具スピンドルを並べて設置して回転

Fig. 15 Machined trial groove

Fig. 16 Depths of trial groove

Fig. 17 Targeted 3D complex shape

工具を用いるが、発生する主な誤差要因は非回転工具の場合と同様であり、2つの回転軸中心と工具制御点の不一致および切込み原点の不一致となる。従って、セッティング誤差の基本的な補正手順もほぼ変わらない。

一方、B軸テーブル上の机上計測機を用いて並進3軸制御により試し削り溝の深さを測定するため、机上計測機のプローブがC軸テーブルに対して垂直となるように留意する必要がある。このため、校正用の基準球をC軸テーブル上に取り付け、X軸方向、Y方向へそれぞれ走査しながら変位を測定してプローブの傾きを求める。この結果から、B軸と計測機のステージを用いて傾きが $\pm 0.01^\circ$ 以下になるまで調整している。なお、各5本の3種類の溝に対してレーザ顕微鏡と机上計測機で溝深さをそれぞれ測定したところ、図14に示すように平均値で100 nm以下の差となり机上計測機でも遜色なく測定でき、標準偏差も10 nm以下の良好な再現性が確認できた。

そこで、試し削り溝の測定を机上計測機へ変更する影響を調査するために、R0.25のルビー球スタイラスでダミーワーク上の加工痕を測定してセッティング誤差を補正した後、簡略化した5軸制御加工用の試し削り溝を被削材に加工した。なお、机上計測機とスピンドルを同じテーブルに置く制約で、B軸の回転角度には 0° 、 15° 、 30° を用いた。図15に加工結果を、図16に測定結果として各B軸回転角度で加工した溝中央の深さを示す。全てのセッティング誤差が正しく補正され、目標の試し削り溝に従って加工できていることが分かる。また、目標の切込み深さ $3 \mu\text{m}$ とほぼ同じ深さになっていることも確認できる。なお、回転角度が大きくなるにつれてわずかに溝が深くなっているのは、最適なB軸回転角度で試し削りできていないことに加え、調整しきれなかったプローブの傾きが要因と考えられる。以上より、机上計測機を用いた場合でも、セッティング誤差を高精度に補正できることが確認できた。

5.2 3次元複雑形状加工

提案したセッティング誤差補正手法を基に3次元複雑形状を加工し、その有効性を検証した。自由曲面を有する3次元形状

(a) Without setting errors

(b) With intentional setting errors

Fig. 18 Simulation results of generated NC data

(a) After compensation

(b) With intentional setting errors

Fig. 19 Machined results of 3D complex shape

(a) After compensation

(b) With intentional setting errors

Fig. 20 Top view of machined results of 3D complex shape

Table 2 Measurement results of top view of 3D complex shape

	Measured dimension mm		
	A	B	C
Target	1.367	1.464	0.548
Machining result after compensation	1.357	1.454	0.435
Machining result with intentional setting errors	1.512	1.503	0.645

を高精度に加工することができれば、複合機能を持つ光学素子や微細な機械部品などに対して超精密切削加工の適用範囲の拡大が期待できる。目標形状を図17に示す。

この目標形状は自由曲面を有する高さ2.25 mm、幅2.2 mmのタービンブレードを模した形状であり、厚さは曲面の位置によって異なり、最も厚い部分では0.4 mm、最も薄い部分では0.1 mmとなっている。工具経路は市販CAMシステム(DP Technology: ESPRIT 2015)を用いて生成し、半径0.5 mmの単結晶ダイヤモンドボールエンドミルを用いて荒加工は3軸制御、曲面の仕上げ加工は同時5軸制御で加工した。Z方向のピッチは150 μmであり、工具の回転数は $25,000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度は15 mm/minとした。このとき、図13に示したように机上計測機と工具スピンドルを並べて設置するため、工具スピンドルはB軸テーブル端近くに位置し、工具制御点がB軸回転中心から極端に離れる。従って、見かけ上のセッティング誤差は非常に大きくなり、工具制御点(x_B, z_B)は $(-52.03289, 59.44590) \text{ mm}$ と検出された。なお、C軸回転中心 O_C から見た工具制御点(x_C, y_C)は $(437.44, 311.74) \mu\text{m}$ であった。

検出したセッティング誤差の0.5%を意図的に残し、両者の加工結果および寸法の測定結果からセッティング誤差の補正効果を比較した。また、作成したNCデータを加工シミュレータ（アイコクアルファ：G-Navi 2.7）で確認するとともに、実験と同じセッティング誤差の創成運動への影響も再現した。図18にシミュレーション結果を示す。セッティング誤差のない理想的な工具制御点による加工シミュレーションでは目標形状通りの加工形状が得られているが、セッティング誤差の補正が不十分な場合には良好な結果が得られないことが分かる。

加工実験の結果を比較して図19に示す。セッティング誤差の有無に関わらず、図17のシミュレーション結果と非常に似た形状が得られていることが分かる。また、セッティング誤差を意図的に残した場合には目標形状通りに加工ができておらず、オーバーカットやアンダーカットがシミュレーションと同様に発生していることが分かる。目標形状の上面の各寸法とそれらをレーザ顕微鏡で測定した結果を図20と表2にまとめて示す。加工したブレード形状を真上から観察することが困難なため、特に図中Cの寸法の測定結果は若干異なるが、回転工具による同時多軸制御においても目標形状と10 μ m程度の誤差に収まっていることが分かる。以上の結果から、自動化したセッティング誤差補正において高精度な3次元形状が得られており、提案するセッティング誤差補正手法の有効性が確認できた。

6. 結 言

多軸制御超精密切削加工の高能率化を目指し、作業者の能力に依存しない新たなセッティング誤差補正手法を提案した。多軸制御マイクロ溝、マイクロ複雑形状、3次元複雑形状など複数の実験を行うことで提案手法の有効性を検証した。本研究で得られた実験結果および考察より、以下の結論を得た。

- (1) 被削材の取付け、取外しを省くため、セッティング誤差補正時の試し削りをダミーワークに施す手法を開発した。

- (2) 形状創成理論に基づき、セッティング誤差が創成運動に与える影響を解析し、回転軸の角度を条件として誤差検出に適した試し削り溝を考案した。
- (3) 机上計測機を用いてセッティング誤差補正の自動化を実現し、セッティング作業も含めた超精密切削加工の更なる高能率化が達成できることを示した。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 工作機械技術振興財団 第35次試験研究助成A、および平成27年度科学研究補助金（基盤研究(B)15H03900）のもとに行われたことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) F. Z. Fang, X. D. Zhang, A. Weckenmann, G. X. Zhang and C. Evans : Manufacturing and Measurement of Freeform Optics, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **62**, 2 (2013) 823.
- 2) 米山陽介, 竹内芳美, 河合知彦, 酒井田康宏 : 非回転工具を用いた自由曲面上への6軸制御超精密マイクロ溝加工, 精密工学会誌, **72**, 5 (2006) 647.
- 3) 帯川利之 : 切削（各分野の現状, 精密工学の今）, 精密工学会誌, **75**, 1 (2009) 64.
- 4) 小原治樹, 富田 悠, 加門真一, 笹木 亮, 森田 昇, 池本有助, 神代充 : ナノメータ加工のための高精度工具位置出し技術の開発（第1報）-基礎実験-, 精密工学会誌, **81**, 4 (2015) 339.
- 5) 園 真, 石田 徹, 寺本孝司, 竹内芳美 : 超精密5軸制御加工におけるセッティング誤差の一般化補正法, 精密工学会誌, **73**, 10 (2007) 1154.
- 6) K. Nakamoto, T. Ishida, N. Kitamura and Y. Takeuchi : Fabrication of Microinducer by 5-axis Control Ultraprecision Micromilling, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **60**, 1 (2011) 407.
- 7) S. Baba, K. Nakamoto and Y. Takeuchi : Multi-axis Control Ultraprecision Machining Based on Tool Setting Errors Compensation, International Journal of Automation Technology, **10**, 1 (2016) 114.
- 8) 春本玲子, 稲崎一郎 : 形状創成関数理論による工作機械の誤差解析, 精密工学会誌, **59**, 6 (1993) 915.
- 9) 稲崎一郎, 岸浪建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基 : 工作機械の形状創成理論—その基礎と応用, 養賢堂, (1997).
- 10) V. Portman, I. Inasaki, M. Sakakura and M. Iwatate : Form-Shaping Systems of Machine Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **47**, 1 (1998) 329.