

小径ボールエンドミルによる3次元曲面加工の高精度化

小島 龍広¹⁾, 扇谷 保彦²⁾, 矢澤 孝哲²⁾

¹⁾ 長崎大学工学部教育研究支援部

²⁾ 長崎大学工学部機械システム工学講座

1. 緒言

金型加工では製品の高性能化や小型化に伴い、複雑形状を高精度に効率よく加工する必要性が高まっている。金型加工には、従来、放電加工機が用いられてきたが、マシニングセンタおよび工具性能の向上に伴い、仕上げ加工までを小径ボールエンドミル加工で効率的に行うことが増えてきている。

小径ボールエンドミルを用いると複雑形状を効率的に加工できるが、小径ボールエンドミルは加工時の切削力によって工具がたわみ易く、切込み量・送り一定の切削条件下においても切れ刃上の創成点の位置の変化に伴って工具のたわみ量が変化し、加工精度に影響を及ぼす¹⁾。

本報では、小径ボールエンドミルの工具切れ刃輪郭上の特定の箇所だけを用いて切削^{2) 3)}を行わせること（工具切れ刃輪郭上の創成点の位置を固定）により、ボールエンドミルのたわみの変化を抑え、加工精度の向上を図る手法およびその効果を確認するために実施した切削実験の結果について述べる。

2. 創成点固定による加工精度向上の基本構想

図1は工具が工作物を3軸制御加工で創成する様子を示している。図の工具位置において、切れ刃上の創成点の位置をそれぞれ a , b , c とする。工具に加わる切削力を、創成点において加工面の法線方向の力 F と単純化して考えると、切削条件が一定ならば力 F も一定である。このとき切削力 F の工具軸に垂直な横荷重が工具をたわませる力とみなせる。工具送りを図のように与えた場合、3軸制御加工では工作物形状（勾配）に応じて創成点の位置が切れ刃外周部 a から先端部 c の方へと移動する。このため横荷重も図の F_a , F_b , F_c のように変化する。この横荷重に工具たわみ量は比例するので、創成点の位置が変化することで工具たわみ量も変化する。

図2は創成点を切れ刃上の特定の箇所に固定し、4軸制御加工で創成する様子を示している。創成点の位置を特定の箇所に固定し工具姿勢を変化させながら切削すると、横荷重 F_a , F_b , F_c を一定に保つことができる。それゆえ工具たわみ量も一定に保たれる。さらに、このたわみ量を補正すれば加工精度は向上すると考えられる。これが創成点固定を用いた切削（創成点固定法）の構想である。

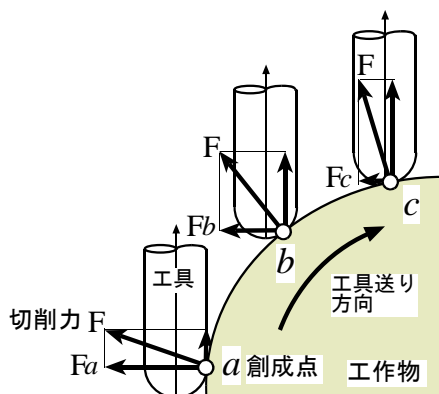


図1 3軸制御加工

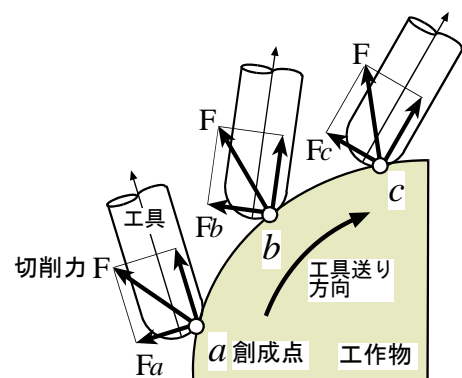


図2 創成点固定による4軸制御加工

3. 等勾配法による工具経路の算出

創成点固定を用いた切削を行う場合、工具経路の算出をいかに正確に行うかが重要となる。本報では、解析的な工具経路算出を基礎とした等勾配法^{4)~6)}という手法を用いている。図3は工具がその運動によって工作物を創成する様子を示し、工具輪郭曲線、工具上の任意の点 P の運動曲線（破線）、工具経路（原点の運動）曲線（太実線）、工作物形状曲線が示されている。工具の原点 O_c が工具経路曲線に沿って A から B の位置へ移動しながら工具姿勢 β が変化すると、工具輪郭が工作物形状曲線を創成する。この創成曲線が工作物の表面となる。工作物の形状曲線は工具輪郭上の異なる点で創成される。工具上の任意の点 P は工具の運動に従って工具運動曲線を描く。工具は B の位置を通る瞬間に、点 P が工作物表面上の一点 W を創成する。この瞬間、点 P を含む工具輪郭曲線についての接線 a が、点 P が描く工具運動曲線についての接線 b と、工作物形状曲線の接線 c に一致する。これらの接線の勾配を T_c (工具)、 T_t (工具運動)、 T_w (工作物) とすると、三つの接線の勾配も等しいので $T_c = T_t = T_w$ となる。この原理を利用すれば、工具輪郭曲線、工具運動曲線、工作物形状曲線の三つのうち二つが分かれば、残りの一つを解析的に求めることができる。3次元の場合は三つの接平面が一致するという性質を利用する。

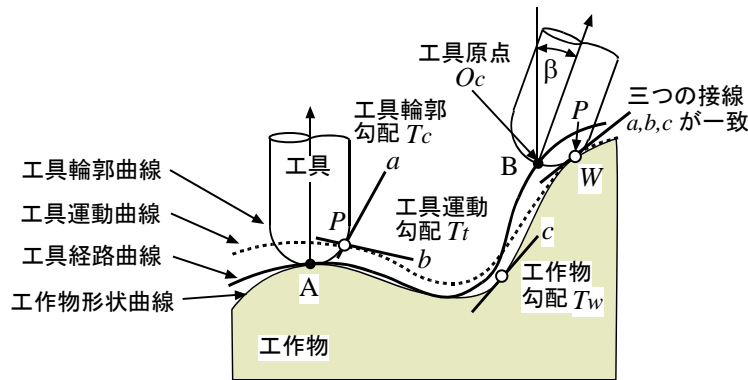


図3 等勾配法の原理

5軸制御加工の場合、図4の工作物座標系 x - y - z と工具座標系 ξ - ζ - η を用いて、工具切れ刃上の創成点 $P(r, \eta, \theta)$ を工作物座標系 x - y - z で表すと式(1)となる。

$$\begin{aligned} x &= O_x + \eta \cos \alpha \sin \beta + r (\cos \alpha \cos \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta) \\ y &= O_y + \eta \sin \alpha \sin \beta + r (\sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta) \\ z &= O_z + \eta \cos \beta - r \sin \beta \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

工具経路算出では工具輪郭勾配と工作物形状勾配が既知なので、工具上の創成点を工作物上の加工点に一致させることによって、工具原点の位置 $O_c(O_x, O_y, O_z)$ が得られる。本報では、使用する工作機械の制約から4軸制御加工を行っており、その場合は $\alpha = 0$ として工具経路を算出している。

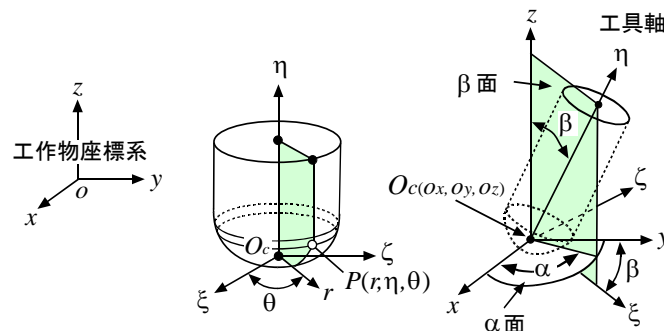


図4 工作物座標系と工具座標系

4. 実験方法および条件

切削実験に用いた工作機械は、図5に示すように CNC 円テーブルを付加し4軸制御仕様とした立型マシニングセンタである。加工面形状については直径 20mm の円筒面とし、円周方向に 1° 、軸方向に 0.1mm 刻みで格子状に離散データで形状を定義した。被削材には被削性に優れた快削黄銅 (JIS C3604) を使用した。工作物は円テーブルに三ツ爪チャックと心押台センタで支持された状態で把持されており、取り付け精度は外周部の振れで $1\mu\text{m}$ 程度である。切削実験では、図6に示すように工具切れ刃上の創成点 P とボール部中心を結んだ線が、工具軸と常に一定の傾き ϕ をなすように工具姿勢および工具経路を設定した。

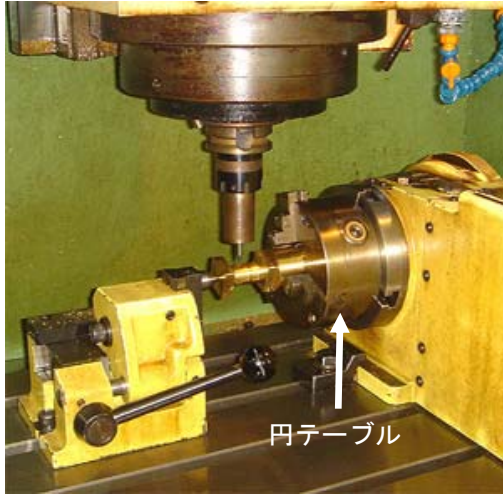


図5 実験に用いた工作機械

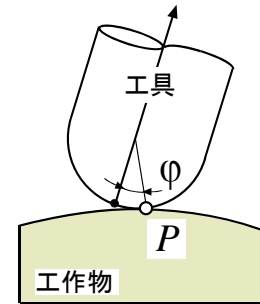


図6 創成点の位置 P

図7に4軸制御加工の様子を示す。加工に際しては工作物座標系 x - y - z を図のように設定し、図に示す向きの送り (回転) を工作物に与えた。使用した工具は $r = 0.5\text{mm}$ (r 精度 $\pm 2\mu\text{m}$) の超硬ボールエンドミルである。取り付けに際し、工具突出し長さは 30mm に設定した。主軸に取り付けられたエンドミルにはシャンク部で $10\mu\text{m}$ の振れがあった。表1に切削条件を、図8に加工後の工作物と使用した工具を示す。

表1 切削条件

工具半径	0.5 mm
刃数	2 枚
回転数	8000 min^{-1}
送り速度	800 mm/min
切込み量	0.2 mm
ピックフィード量	0.1 mm

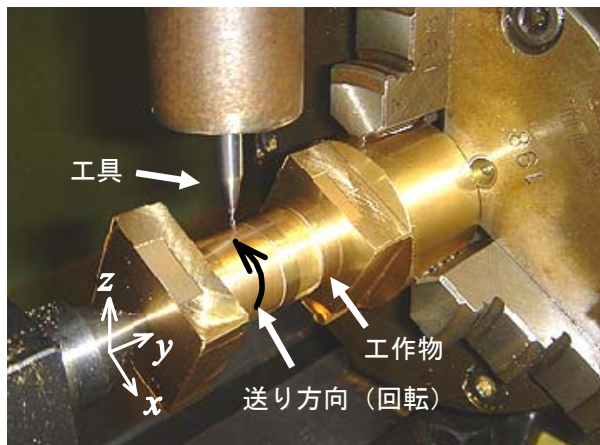


図7 4軸制御加工の様子

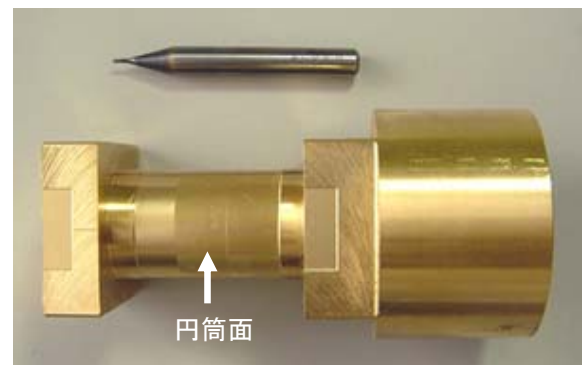


図8 工作物と使用した工具

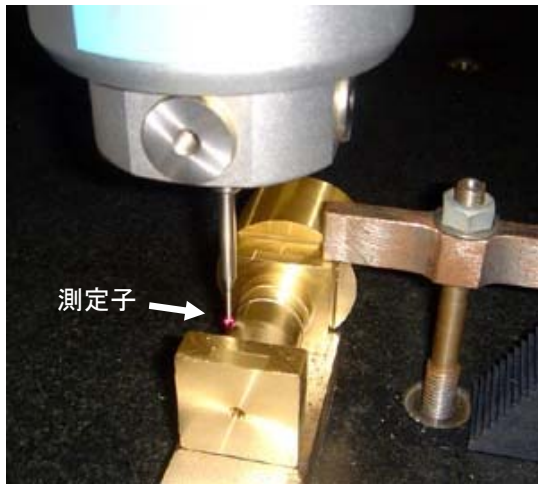


図9 三次元座標測定機を用いた測定

加工精度の評価には図9に示すCNC三次元座標測定機を使用し、図10に示すように加工面と設計面の法線方向偏差を測定した。

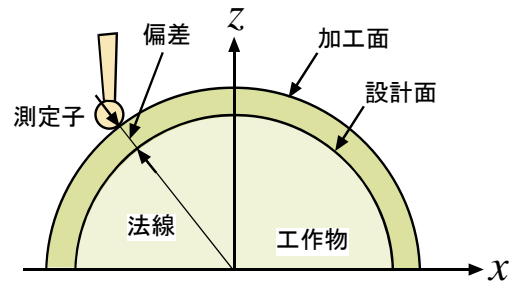


図10 法線方向偏差

5. 実験結果および考察

切削実験は、まず円筒面（半径10mm）を3軸制御加工で行い、工具切れ刃輪郭の先端部から外周部までの加工誤差を調べた。図11に示すように3軸制御加工ではボール部全体を用いて切削がなされる。すなわち $\psi = 0^\circ$ から $\psi = 90^\circ$ まで図のように工具送りと与えると、加工位置の変化に伴って、工具切れ刃の創成点の位置は外周部付近からボール先端部側に移動する。図12にその時の加工誤差を示す。加工誤差については工作物の法線方向偏差を円周方向に2度間隔で測定した。図12の測定点aは図11の工作物上の加工点 $\psi = 80^\circ$ の点aに対応しており、測定点bは $\psi = 50^\circ$ の点bに、測定点cは $\psi = 20^\circ$ の点cにそれぞれ対応している。図から3軸制御加工では最大約 $20\mu\text{m}$ の加工誤差を生じており、その誤差はボールエンドミルの外周部に近い位置で切削するほど大きくなっている。

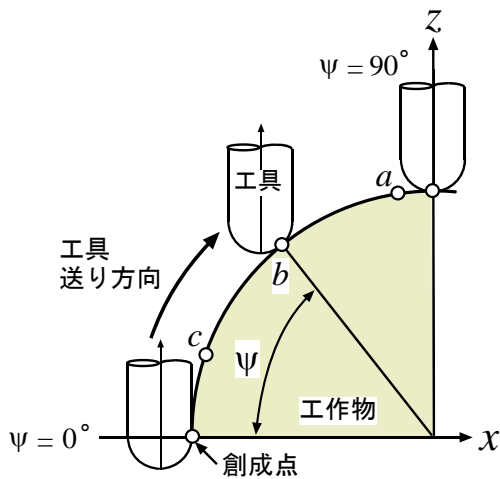


図11 3軸制御加工

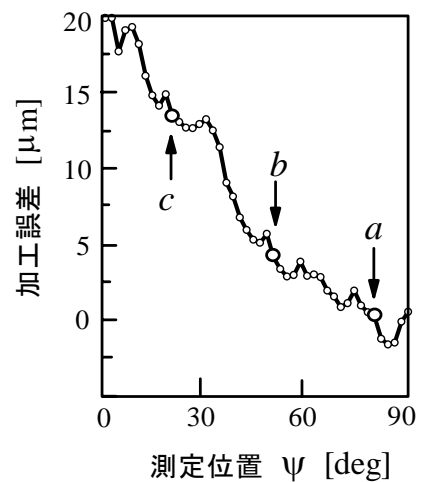


図12 3軸制御加工による切削結果

工作物上の点a、b、cの3点を3軸制御で加工する場合、工具切れ刃上の創成点の位置は、図13に示すように工具軸とのなす角度 ϕ が $\phi = 10^\circ$ 、 $\phi = 40^\circ$ および $\phi = 70^\circ$ の点である。これら3点の創成点を用い、創成点の位置を固定する4軸制御加工実験を行った。図14に示すように工作物にy軸回りの

運動を付加し円筒面を切削した。創成点 $\phi=10^\circ$ の切削では、図に示す工作物の A の領域 ($\psi=0\sim60^\circ$) を、創成点 $\phi=40^\circ$ の切削では同様に B の領域 ($\psi=60\sim120^\circ$) を、創成点 $\phi=70^\circ$ の切削では C の領域 ($\psi=120\sim180^\circ$) をそれぞれ加工した。

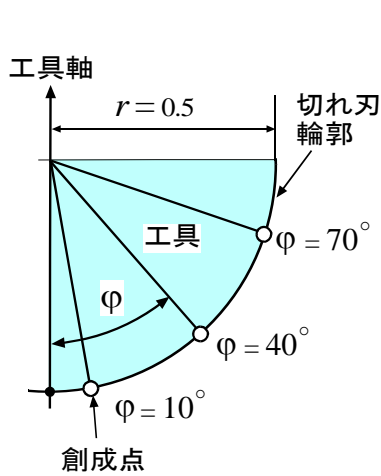


図 1 3 工具切れ刃の創成点の位置

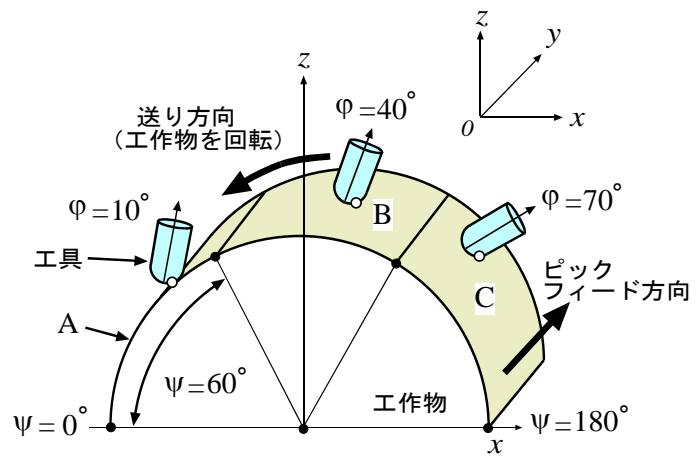


図 1 4 創成点固定による 4 軸制御加工

図 15 に、4 軸制御加工で創成点の位置を固定して切削した結果を示す。加工誤差は各切削領域を 2 度間隔で 30 点を測定した。図には創成点 $\phi=10^\circ$ で切削した面 A との相対的な誤差を示している。図に示すように、各領域において誤差の大きさはほぼ一定となっており、創成点を固定した結果たわみ誤差の変化が抑制されていることが分かる。図から $\phi=40^\circ$ の創成点を用いた加工面 B は加工面 A に比べ $5\mu\text{m}$ 程度、 $\phi=70^\circ$ の創成点で切削された加工面 C は $15\mu\text{m}$ 程度法線方向偏差が大きくなっている。これは創成点 $\phi=70^\circ$ の位置が $\phi=10^\circ$ より工具先端からの角度が大きいため切削抵抗の影響をより強く受け、工具たわみ量も大きくなったためと考えられる。

次に、創成点 $\phi=10^\circ$ の基準面 A と同じ寸法になるように、NC データに $\phi=40^\circ$ と $\phi=70^\circ$ の誤差量をそれぞれ補正し、創成点の位置を固定して切削を行った。その結果を図 16 に示す。加工面 B、C とともに $5\mu\text{m}$ 程度の誤差内に収まり補正の効果が認められる。

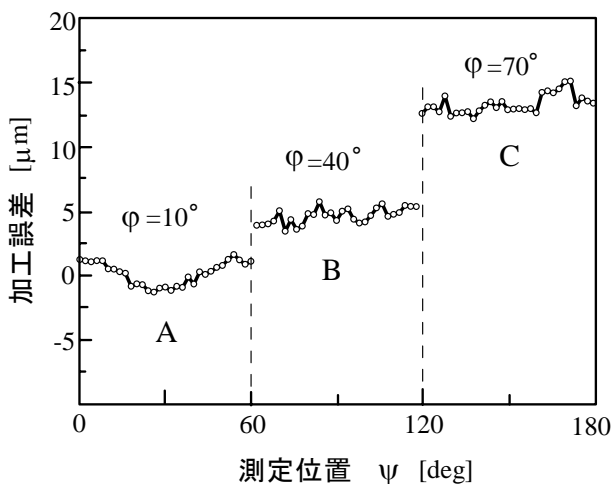


図 1 5 創成点固定による切削結果

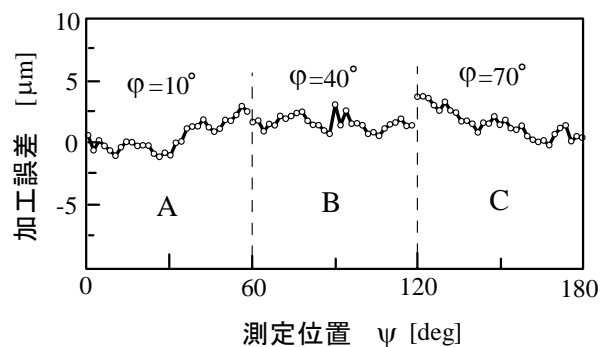


図 1 6 誤差量を補正した切削結果

図 17 は切れ刃上の創成点の位置と加工誤差の関係を示す。図 15 および図 16 の加工誤差は、それぞれの切削領域を 30 個の測定点で示したが、図 17 ではこれら 30 個の平均値を求めた誤差を示している。図は $\phi=10^\circ$ で切削した場合を基準とした相対的な誤差を示している。補正なしの場合、創成点の位置が切れ刃の外周部で切削した場合ほど大きい。この誤差の原因として、工具たわみの影響とともに工具振れの影響が考えられる。今回の実験では、エンドミルの振れがシャンク部で約 $10\mu\text{m}$ あったが、この工具振れの影響はボール外周部ほど大きい。今後、これらの誤差の影響を明らかにする必要がある。

また、創成点 $\phi=40^\circ$ と $\phi=70^\circ$ の場合に誤差量を補正した切削ではいずれの誤差も $2\mu\text{m}$ 程度に収まり誤差は小さくなっている。この結果から創成点の位置に対する誤差量を定量的に求め、その誤差量の補正を行うことで形状、寸法精度の向上が図れる。

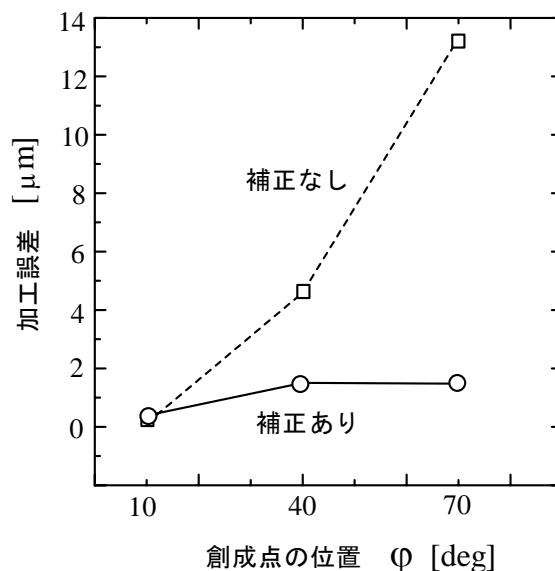


図 17 創成点の位置と加工誤差の関係

6. 結 言

小径ボールエンドミルによる形状切削において、工具切れ刃上の創成点の位置を特定の箇所に固定して切削させることにより、工具たわみ量の変化に伴う形状誤差の発生を抑制することができることを確認した。また、切れ刃の創成点の位置に対応する誤差量を補正することで形状、寸法精度の向上が図れることを示した。

謝 辞

切削実験を行うにあたり、長崎大学工学部教育研究支援部生産技術室のスタッフの皆様にご多大なるご支援を頂きました。また、柳原総括技術長には、これまでに写真撮影に関して多くの適切なお助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大塚裕俊, 山路伊和夫, 垣野義昭, 中川平三郎 : 焼入鋼のエンドミル加工に関する研究 (第 3 報), 精密工学会誌, 69,4(2003)549.
- 2) 小島龍広, 西田知照, 扇谷保彦 : 数値制御工作機械による 4 軸制御加工 (第 1 報: 工具切れ刃の固定点を用いる場合の工具経路), 長崎大学工学部研究報告, 32, 58 (2002) 39.
- 3) 周藤大, 扇谷保彦, 矢澤孝哲, 小島龍広, 西田知照 : 小径ボールエンドミル多軸曲面加工の高精度化 (創成点固定法の提案), 日本機械学会九州支部第 58 期講演会講演論文集, (2005)221.
- 4) 西田知照, 張元建 : 接線勾配を利用した自由曲面の 5 軸制御加工アルゴリズムの開発, 精密工学会誌, 64, 12 (1998) 1801.
- 5) 西田知照, 張元建, 扇谷保彦, 小島龍広 : 接線勾配を利用した 5 軸制御加工用工具経路の算出 (等勾配法の基礎理論とその応用), 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 632.
- 6) 西田知照, 小島龍広, 扇谷保彦 : 数値制御工作機械による多軸制御加工に関する研究, 長崎大学工学部研究報告, 30, 55 (2000) 105.