

## 加工誤差の補償を事前予測によって

### ソフトウェア的に実現する知的工具経路生成手法の開発

Development of intelligent generation method for tool path

with error correction based on cutting force prediction

プロジェクト代表者：金子順一（理工学研究科・助教）

Jun'ichi KANEKO

#### 1 はじめに

多軸制御切削加工機の普及に伴い、自由曲面の加工においても加工面に対する工具姿勢を選択的に設定して仕上げ加工を行うことが一般的になりつつある。一般にボールエンドミルを用いた仕上げ加工においては、加工面に対する工具の相対姿勢、ピックフィード方向・幅、工具1刃あたり送り量、工具回転角位相差等の条件が加工面の性状に大きな影響を与えることが知られている。これらの関係については以前よりさまざまな検討が行われており、高送り時のカッターマークによる表面粗さ生成の幾何的解析や、工具相対姿勢の変更による面性状変化の傾向等が報告されている。

ところで、近年の主軸の高速化に伴い、金型等の仕上げ加工においては工具1刃あたりの送り量が非常に小さな切削条件が広く用いられつつある。この種の切削条件では、加工後に残る面の大部分は被削物への工具刃の切込が工具刃先の丸み半径よりも小さい状態で創成される。このとき、工具刃先の逃げによる面全体の目標形状からのずれや、被削物除去状態の遷移による面性状の悪化を予測するためには、弾性変形による工具刃の逃げや加工面誤差の再生といった現象を考慮して工具刃先各部分における切込の状態を推定する必要がある。しかしながら、多軸制御切削加工を対象とした精密な被削物除去深さの解析は未だ行われておらず、工具姿勢の変化が切削抵抗や加工誤差もたらす影響には不明な点が多い。

そこで筆者らは、過去にスクエアエンドミル加工の誤差予測で提案した被削物除去モデルを導入し、ボールエンドミルによる仕上げ加工において、加工面を工具刃が創成する瞬間の被削物除去深さおよび切削抵抗を推定する手法を提案している。過去の研究では、工具の被削物への切込の深さがきわめて小さい仕上げ加工条件下で傾斜面へのボールエンドミル加工を対象とした被削物除去状態の解析を行い、切削抵抗の正確な予測を実現した。本研究プロジェクトでは、加工面の法線と工具の進行方向がともに工具軸の向きと直角以外の角度をなす多軸制御切削加工条件において、ねじれ刃を持つボールエンドミルによる面創成の状態を推定し加工誤差に対する工具姿勢の影響の解析を行い、誤差補償アルゴリズムの検討を行った。

#### 2 被削物表面形状の記述と工具刃の移動に伴う更新

工具刃がある加工面を創成する際の切削抵抗を予測するためには、その瞬間の工具刃各部分における切込深さの正確な推定が必要となる。実際の加工では、工具は切削抵抗によって変形し、工具刃各部の切込深さは切削抵抗と弾性変形に対する反力の釣り合いから決定される。また、多軸制御切削においては工具刃各部分の通過軌跡が姿勢の変更によって大きく変化し、それまでの刃先通過で加工面に転写されたツールマークと共に切込深さに大きな影響を与えられられる。そこで本研究では被削物の表面形状を、Zmap法により稠密な間隔で配置された格子点を結ぶ多面体として離散的に記述し、これを随時工具運動に応じて更新することで加工面形状の影響を考慮可能とする。図1は工具の進行方向  $U$ 、工具軸方向  $Z$  および加工面法線  $W$  に対する座標系の関係を示す。工具の回転・送りに伴い、各格子点の高さ情報が逐次更新され、工具刃各部の被削物に対する切込深さの推定が可能となる。

#### 3 検証条件

本報で対象とする加工条件を表1に示す。仕上げ加工で一般的に用いられるダウンカットを想定し、ピ

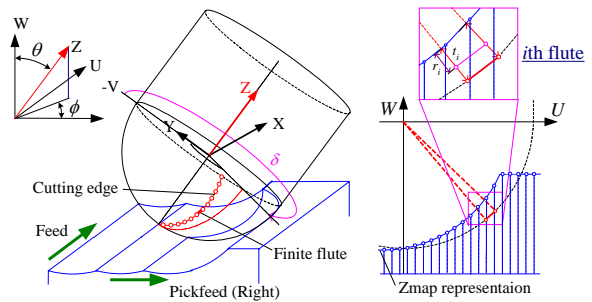


Fig.1 Cutting depth estimation based on Zmap method

Table.1 Cutting Conditions

Workpiece material	S50C
Tool radius [mm]	8
Number of cutting edge	1
Helix angle of cutting edge[deg]	30
Type of cut	Right pickfeed Right-Forward Tilting
Axial depth of cut [mm]	0.4
Feed rate [mm/rev]	0.2
Pickfeed [mm/path]	0.4

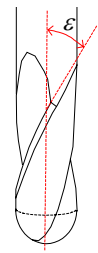


Fig.2 Helix angle

ックフィード方向を工具送り方向に対して右側とする．このとき，工具軸の加工面法線に対する姿勢角  $q$  とピックフィード方向に対する姿勢角  $f$  を変化させ，カッターマーク形状，工具刃先除去深さ，瞬時切削抵抗の変化を求めた．工具としては図2に示すように切れ刃が工具中心軸に対して  $\varepsilon=30^\circ$  の角度を持つ一枚刃のソリッドエンドミルを想定する．モデルの比切削抵抗値には過去の研究にてボールエンドミルを用いた切削実験によって求めた値を適用した．

#### 4 評価結果

##### 4.1 加工面創成時の除去深さ分布状態の変化

図3は  $\theta$  と  $\phi$  をそれぞれ変化させた場合に得られる加工面上のカッターマークの形状を表す．面の色は，加工面上の各位置が創成された瞬間にその場で工具刃が被削物より除去していた深さ  $r$  を表しており， $W$  方向の長さは  $UV$  方向に対して20倍に拡大して表示している．なお， $\omega$  はピックフィード間の工具回転角の位相差を表す．予測結果から，カッターマークの形状は工具刃先端の加工面創成への関与の有無によって変化し， $\theta$  が一定以上になるとほとんど変化しなくなることがわかる．工具半径  $8.0\text{mm}$ ， $f=0.2\text{mm/rev}$  の条件において，カッターマーク上の各位置における  $r$  の値はいずれも  $5\mu\text{m}$  以下となり，加工面は工具刃先の丸みよりも除去深さのほうが小さい塑性変形状態で創成されると推測できる．

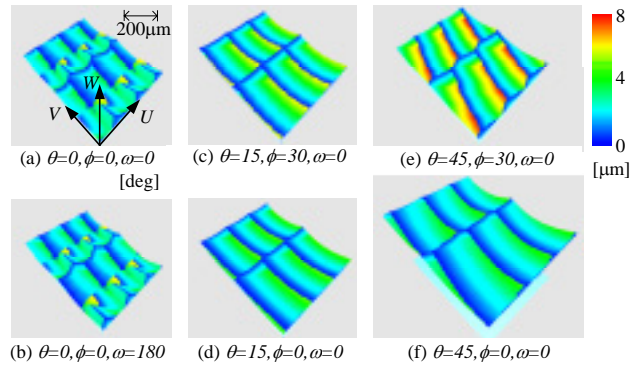


Fig.3 Removal depth on cutter marks

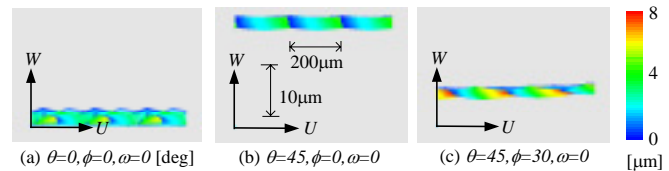


Fig.4 Cutting error on cutter marks

##### 4.2 加工面創成時の除去深さ分布状態の変化

図4は，各工具姿勢におけるカッターマークと目標平面の位置関係を  $V$  の正の向きから描画したものである． $W=0$  は加工面に削り残しが一切生じないときの加工面の位置に相当する． $\theta > 0^\circ$  の条件で加工面が  $W$  方向に大きくずれ，カッターマーク内のカスプとは別に一般的な削りのこしが生じることがわかる．図5は，各工具姿勢におけるカッターマークの最大削り残し高さ  $h_m$  およびカッターマーク底面部分の最小削り残し高さ  $h_l$  の工具姿勢に対する変化を示す．いずれの条件においてもカッターマーク内の高低差が  $4\mu\text{m}$  以下となるのに比べて底面部分の高さは工具姿勢によって大きく変化する．これは刃先丸みの影響によって加工面上に削り残しが生じ，その上を工具が通過する際の切削抵抗の作用によって再帰的に工具刃の通過軌跡が変位するのが原因であると考えられる．

加工面上の誤差が最大となる  $\phi$  の角度は， $\theta$  に対してそれぞれ異なる．図6はこの原因に関して， $\phi=7.5^\circ$ ， $\omega=0^\circ$  の条件で工具通過後に最終的に被削物表面となる位置を工具が創成する角度と，瞬時切削力の関係を表したものである．破線で示した工具回転角  $\delta'$  の範囲は，加工面上に最終的に残る部分が創成される範囲を表す．このとき，工具のねじれ角によって姿勢ごとに他の工具切れ刃の被削物に対する切込の状態に変化が生じ，瞬時切削力の増減のタイミングによって工具刃が面を創成する瞬間の切削抵抗に差が生じる．これが誤差に大きな影響を与えたと考えられる．

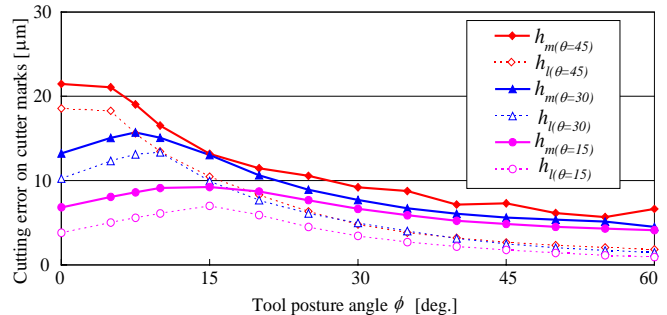


Fig.5 Relation between tool posture and cutting error

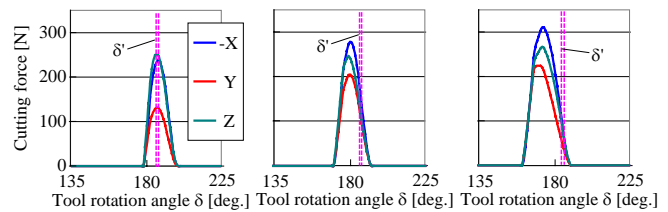


Fig.6 Instantaneous cutting force when finished surface is generated

#### 5 結言

本研究では，ボールエンドミルによる多軸制御切削加工における工具刃の被削物への切込状態を推定し，仕上げ加工時の加工面性状および加工誤差の解析を行った．刃先丸みの影響を考慮可能なプロセスモデルを適用し，微小送り条件下でのカッターマークの形状および目標面からの距離の分布を評価した．結果から，微小送り加工時には加工後に加工面として残るカッターマーク部の大半が塑性変形状態に相当する除去状態で創成されていること，工具の傾斜によって工具先端が加工面の創成に関与しなくなり面性状が向上すること，その反面，工具弾性変形による加工誤差が増加すること，等が明らかとなった．