

## 加工領域評価に基づく工具姿勢決定法

## A Study on Attitude Decision based on Cutting Area Evaluation

北大 ○米光勇一 近藤司 金子俊一

## 要旨

本研究は、多軸制御工作機械を用いた3軸制御加工の観点から、要求面形状に対する工具姿勢評価と工具経路生成に関して検討する。本報告では、工具姿勢と要求面の幾何学的関係から加工領域を抽出し、工具の加工能率の観点から工具姿勢を評価する方法を述べる。

## 1. はじめに

NC 工作機械を用いた金型加工における工具経路の生成時には、加工要求面と工具の干渉を回避する必要がある。一般に、工具半径より大きな曲率を持つ領域や、要求面に対する工具半径分のオフセット面が工具に対し多価に交わる領域では工具が移動できないため加工が不能である。そこで、本研究では、オフセット面生成方式として逆オフセット法<sup>1)</sup>を用い、さらに、その z-map を作成することで、オフセット面中の工具が移動可能な領域（工具移動オフセット面）と、それに対応する要求面中の加工可能な領域を認識する。このようにして得られる領域を加工可能領域とする。加工要求面に対する工具経路を考えると、加工可能領域の面積が大きくなるような工具姿勢を探索することで、より高能率な経路の生成を期待できる。一方、上記の方法で求めた加工可能領域では切削時の状態や仕上がり後の面粗さ等が考慮がされていないため、たとえ、幾何学的に加工が可能であったとしても、送り速度等の加工能率、もしくは、面粗さ等の加工面性状において、不適な領域が存在する可能性がある。一般に、工具は切れ刃位置によって加工能率や仕上がり後の面粗さ等が異なる。したがって、事前の実験・調査によって切れ刃位置における加工状態の良否がわかっていれば、要求面と工具姿勢の関係から加工面と接触する切れ刃位置を調べることで、加工領域の各所の加工状態の予測が可能となる。本研究は、加工可能領域面積の算出と、加工領域の状態予測を行うことで、加工能率や精度問題等における加工系のメカニズムの観点から工具姿勢の評価を行い、その有効性を検証することを目的としている。

## 2. 加工領域に基づく工具姿勢評価

ボールエンドミルでは、加工する切れ刃位置によって切削速度が異なる。切削速度  $v_c$  が工具の切れ刃位置の半径に比例していると考えれば、切削面と軸のなす角を  $\psi$  とすると、 $v_c = k \cdot \sin \psi$  となる。このように、工具は切れ刃位置により加工能率、または、仕上げ面粗さが異なる。したがって、同じ工具経路を用いても工具姿勢によっては加工面性状や加工時間は異なることになる。また、工具半径分のオフセット面が存在しても加工に不適な領域が存在する場合もある。事前の実験・調査によって切れ刃位置における加工状態の良否がわかっていれば、工具姿勢と切削面の幾何学的関係から加工面と接触する切れ刃位置を調べることで、要求面の各所における加工状態の良否の予測が可能となる。仮に、工具切れ刃上の加工能力の良否が図1のように与えられた場合、工具姿勢Aより工具姿勢Bの方に優れた加工状態を示す大きな●印が多いことから、この例では姿勢Bの方が良好な姿勢として評価される。

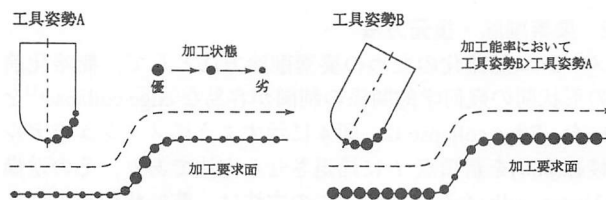


図1：加工領域に基づく工具姿勢評価

## 3. 加工可能領域の抽出

要求面中の加工可能領域認識の方法を述べる。オフセット面中の工具中心が移動可能な領域を工具移動オフセット面とすると、図2のように、要求面のうち、工具移動オフセット面に対応した面がない領域は加工不能となる。したがって、加工可能領域を知るためにはまず、工具移動オフセット面を知る必要がある。本研究では、軸方向に加工時の逆方向として、工具の中心が要求面上を移動した時の刃先の描く包絡面をオフセット面とする逆オフセット法を用いてオフセット面を生成し、そこから、工具干渉を招く領域を削除することにより工具移動オフセット面を認識する。工具軸とオフセット面が多価で交わる場合、奥の面を削ろうとするとその手前の面と工具が干渉を起し加工が不能となる。したがって、工具移動オフセット面はオフセット面中の工具軸上方から見てもっとも近い面のみを抽出した領域になる。オフセット面生成時に、工具軸方向に対する深さを計算し、z-map を作成する。z-map には、工具軸方向上方からもっとも近い面の深さの値が保持される。言い換えると、これは工具移動オフセット面の深さの値が保持されることになる。また、逆オフセット法では、要求面とオフセット面の各所の対応関係が明らかになる。逆オフセット時に、z-map 上にオフセット面の深さとともに、要求面中の工具中心位置を記憶しておく。オフセット処理の終了後、z-map 上に保持された深さと対応関係を参照することで、工具移動オフセット面と、それに対する刃先が加工可能な領域、すなわち、加工可能領域を抽出する。

## 4. 工具姿勢の評価

適当な評価項目に対しそれを満足する工具姿勢を探索することができれば高能率加工が実現できる。本章では、加工能率と加工可能領域面積の観点から工具姿勢を評価するための評価関数の定義とその算出法について述べる。加工可能領域は工具姿勢  $\theta$  によって決まる。要求面を微小領域に分割し、それらを  $i(i=1, 2, \dots, N)$  とするとき、

$$\delta_i(\theta) = \begin{cases} 1 : \text{微小領域 } i \text{ が加工可能} \\ 0 : \text{微小領域 } i \text{ が加工不可} \end{cases} \quad (1)$$

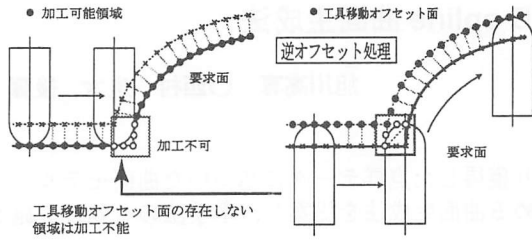


図2：工具姿勢に対する加工可能領域抽出

とする。このとき、加工可能領域  $U_A$  は  $\delta_i(\theta)$  を用いて、

$$U_A(\theta) = \{ i \mid i = 1, 2, \dots \cap \delta_i(\theta) = 1 \} \quad (2)$$

と、表すことができる。微小領域  $i$  の面法線を  $\varphi_i$  とすると、工具姿勢  $\theta$  と  $i$  の面法線  $\varphi_i$  から微小区間  $i$  と接触する工具切れ刃位置が定まり、 $i$  における加工能率  $\lambda_i(\theta, \varphi_i)$  が求まる。ここで、加工領域を加工可能領域全体と考え、加工能率に基づく工具姿勢の評価関数  $\Phi_1(\theta)$  を次のように与える。

$$\Phi_1(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta, \varphi_i) \delta_i(\theta)}{\sum_{i=1}^N \delta_i(\theta)} \quad (3)$$

$\Phi_1(\theta)$  は言い換えると、加工面積における要求面全体の平均加工能率となる。また、要求面の総面積を  $A$  として、加工可能面面積に基づく工具姿勢の評価関数  $\Phi_2(\theta)$  を次のように与える。

$$\Phi_2(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i(\theta)}{A} \quad (4)$$

$\Phi_2(\theta)$  は言い換えると、要求加工面に対する加工可能領域の面積比である。さいごに、最終的な工具姿勢評価値  $E(\theta)$  を  $\Phi_1(\theta)$  と  $\Phi_2(\theta)$  の線形補間によって与え、

$$E(\theta) = (1 - \alpha)\Phi_1(\theta) + \alpha\Phi_2(\theta) \quad (5)$$

とする。 $\alpha = 0$  で加工可能面に対する加工能率評価となり、 $\alpha = 1$  で加工可能面の領域評価となる。

## 5. 実験

図3は、本工具姿勢評価法によるシミュレーション実験例を示したものである。(a)は評価を行った要求形状(fan)で、(b)は仮想的に作成した切れ刃位置における加工能率である。この例では、 $\lambda_i(\theta, \varphi_i) = \sin 2\psi$  とした。ただし、 $\psi$  は  $\theta$  と  $\varphi_i$  のなす角である。(c)に  $\alpha = 0$  としたときの  $E(\theta)(= \Phi_1(\theta))$  を示し、(d)は同様に  $\alpha = 1$  の場合の  $E(\theta)(= \Phi_2(\theta))$  を示した。グラフ中央部で、工具軸がZ軸( $R_x=R_y=0$ )方向となり、そこから離れるにしたがい工具は傾いてくる。(c)において、工具軸方向が  $R_x, R_y = 0$  付近のときは、工具先端部での加工領域が多いため、 $\Phi_1(\theta)$  は小さくなり、工具軸が傾くにしたがって高能率な切れ刃が多く使われるため  $\Phi_1(\theta)$  は大きくなり、 $R_x, R_y = \pi/2$  付近では工具側面部分での加工領域が多くなるため  $\Phi_1(\theta)$  は小さくなっている。これに対して、(d)では、工具軸( $R_x, R_y$ )とfanの羽の方向に関係して面積比が変化し、 $R_x = R_y = 0$

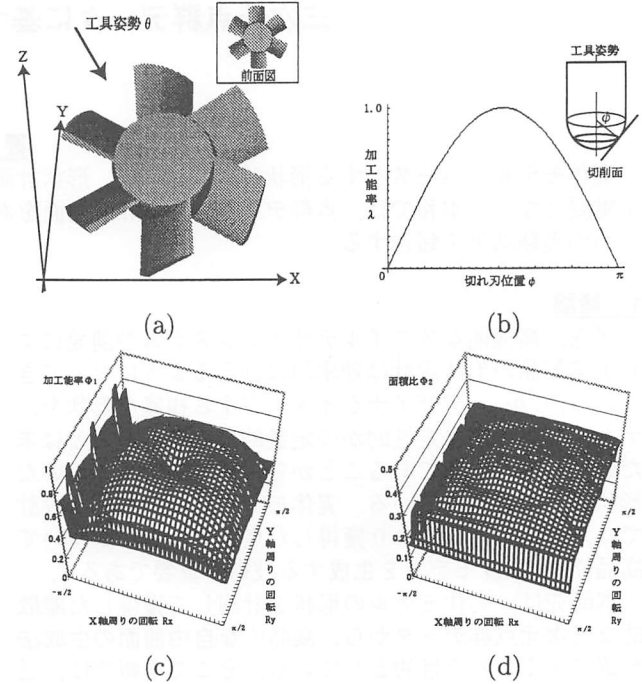


図3：シミュレーション実験結果

近傍において  $\Phi_2(\theta)$  が大きくなっており、要求面中の加工可能領域の面積比が高くなっていることを示している。

## 6. 多軸制御加工への適用

ここまでで述べた工具姿勢評価法の多軸制御加工への適用を考える。実際の加工では工具姿勢の変更を数回行って加工が完了する。今、姿勢変更が計  $N$  回の加工を考える。初期姿勢を  $\theta_0$ 、変更後の各姿勢を  $\theta_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )、また、同時3軸で考えた場合の  $\theta$  における加工可能領域を  $U(\theta)$  としたとき、多軸制御加工における加工可能領域  $U_A$  を

$$U_A = \bigcup_{k=1}^N U(\theta_k) \quad (6)$$

と定義する。加工計画の最終的な目標は姿勢の変更を繰り返し、要求面中の加工可能領域がその上限に一致するまでのプロセスを考えることである。言い換えると、(1)式で与えられる  $U_A$  の面積が全姿勢における加工可能領域の面積と一致するような  $N$  とその具体的な姿勢を考えることになる。

## 7. まとめ

本報では、加工能率と加工可能面積比の観点から工具姿勢を評価法を提案し、シミュレーション実験を行った。

### 謝辞

本研究は北海道大学名誉教授五十嵐悟氏との有益な議論を通してまとめられたものである。

### 参考文献

- 1) 近藤司ほか：「逆オフセット法を基にした形状加工処理」，精密工学会誌 54 巻 971~976 頁 (1988)