

## エンドミル加工における除去領域推定技術の開発

埼玉大学 ○竹内航, 埼玉大学大学院 ◎堀尾健一郎, 金子順一, 山崎次男

### 要旨

エンドミル加工における切削抵抗の予測に際しては、工具による除去領域の推定に際して加工前の被切削物形状の把握が必要であり、切削シミュレーションの実施が必須とされる。そこで本研究では、切削加工中に主軸移動に伴って切削工具前方の被切削物の表面形状を実時間で計測し、切削抵抗を作用の直前に予測するシステムを開発する。本邦では、光切断法による3次元点群取得とこれに基づく除去領域推定手法について述べる。

### 1. 緒言

切削加工時には必ず切削抵抗が発生する。これは工具の摩耗及び破損の大きな要因であり、この予測が可能であれば、工具摩耗や破損のリスクを大幅に低減することが可能となる。切削抵抗は、加工物の除去領域(図1)と工具切れ刃あたりの除去深さから予測が可能であるが、切削領域は工具の運動によって次々に変化するため、その推定に切削シミュレーションが必須になっていた。そのために近年では、切削シミュレーションソフトウェアによる切削抵抗の事前推定システムが実用化されつつある。しかし、シミュレーションの実施に際しては加工開始時の加工物表面の形状と、工具移動に伴う加工物表面の形状変化の推定が必要となる課題があった。そこで、本研究では、加工直前に工具移動前方の加工対象部分の形状を計測する手法を開発し、形状情報の推定なしに切削抵抗を事前推定する手法を実現することを目的とする。

### 2. システム概要

#### 2.1 形状測定原理

切削加工中に主軸移動に伴って切削工具前方の被削物の表面形状の2次元断面形状を取得する。その断面を積み重ねることで被削物の3次元形状を取得し、図1に示す工具による除去領域の形状を推定する。

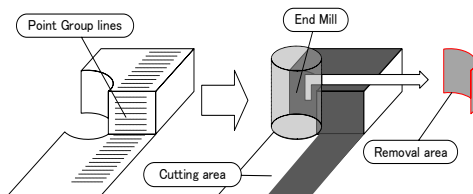


Fig.1 Removal area

#### 2.2 光切断法

本研究では、2次元断面形状の取得方法として光切断法を用いる。これは、スリット光と画像センサを用いた3次元計測手法の1つであり、画像センサよりスリット光が照射された被削物の2次元断面点群を取得、それを積層することで3次元点群を取得することが出来る。

#### 2.3 3次元点群再構成法

光切断法で3次元点群情報を得る場合、画像のスケール行列 $s$ と(1)式のようなカメラ行列を与えることで、2次元カメラ座標 $p = [u \ v \ 1]^T$ が、3次元世界座標 $P = [X \ Y \ Z]^T$ を用いて、(2)式のように表すことができる。この式を逆変換することで2次元座標から3次元座標が求まる。

$$\mathbf{A}[\mathbf{R}|\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} fs_u & fk_s & u_0 \\ 0 & fs_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R}|\mathbf{T}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

本研究では、カメラ行列の推定にZhangの手法によるカメラキャリブレーションを用いる。これは、パターンが決まったチェッカーボードを複数枚撮影することで、その画像の特徴点からカメラパラメータを推定する方

法であり、図3のように平面座標系 $(u, v)$ と世界座標系 $(X, Y, Z)$ を対応させることが出来る。この時、スリット光の世界座標のX軸に合わせることで3次元再構成時通常に $X=0$ とすることができ、(3)式による変換でカメラ座標から世界座標を求めることが出来る。

$$\begin{aligned} X &= 0 \\ Y &= \frac{(C_8C_{11} - C_7C_{12})u + (C_3C_{12} - C_4C_{11})v + (C_4C_7 - C_3C_8)}{(C_7C_{10} - C_6C_{11})u + (C_2C_{11} - C_3C_{10})v + (C_3C_6 - C_2C_7)} \\ Z &= \frac{(C_6C_{12} - C_8C_{10})u + (C_4C_{10} - C_2C_{12})v + (C_2C_8 - C_4C_6)}{(C_7C_{10} - C_6C_{11})u + (C_2C_{11} - C_3C_{10})v + (C_3C_6 - C_2C_7)} \end{aligned} \quad (3)$$

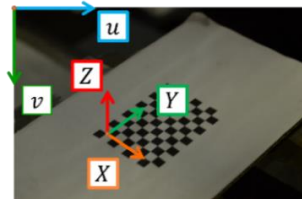


Fig.3 Correspondence of checkerboard and the coordinate system

### 3. 実証機概要

#### 3.1 フライス盤実装装置

本研究では対象をフライス盤として、エンドミルの切削領域とその切削抵抗を予測する。そこで、汎用フライス盤(静岡鉄工所製:タレット形立フライス盤VHR-A)の主軸部分に固定することで被削物の計測を行う実証機(図4)を作成する。XYZの3軸のうち、X方向の加工現象を測定する。また、このフライス盤はベッドの移動量のデータを直接外部に出力できないので、機械的に送り量を測定する工具移動量測定装置(図5)も作成した。

フライス盤実装機は、対象物へ赤色光を照射するフラットラインレーザー(竹中オプトニクス製:LDB10660FL)とその画像を取得する画像センサ(ソニー・コンピュータエンタテインメント製:PlayStationEye)で構成されており、フライス主軸部分へ固定することで、主軸の移動に関わらず工具進行方向前面の計測をすることが出来る。

工具移動量測定装置はロータリーエンコーダとArduinoによって構成され、ベルト・プーリーによってハンドルの回転角を取得する。

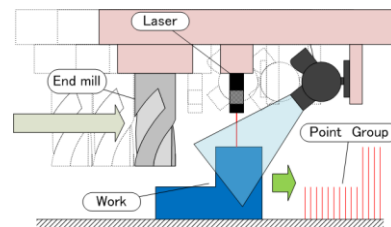


Fig.4 Model of measuring instrument

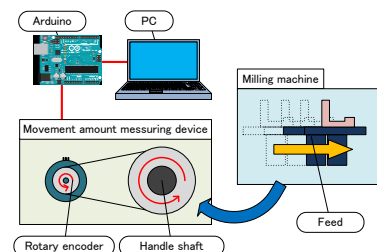


Fig.5 Model of movement amount measuring device

### 3.2 実装プログラム

実証機に実装されるプログラムは以下の3つに大きく分けられる。

1. 移動量測定プログラム
2. 赤色抽出と座標取得プログラム
3. 切削抵抗予測プログラム

1は工具移動量測定装置より送られてきたエンコーダの回転数を移動量に変換し、2の切削領域推定プログラムへと渡すものである。

2は、本研究で目的とする切削領域の予測を行うものであり、このプログラムによって被切削物の形状取得を行う。ここでは赤色レーザーが照射された対象の輪郭を抽出し、得られた輪郭の座標に点群をプロットすることで3次元点群情報を取得する。また、あらかじめ取得しておいた工具の座標及び工具端のZ座標より被切削物との干渉判定を行い、工具が干渉する角度と軸方向への切り込み量を出力する。ここで得られた3次元点群はPCDファイルにより保存され、PCLを用いて可視化することが出来る。

3は過去の研究<sup>9)</sup>で開発されたものを使用する。これは実験によって得られた切削抵抗の値から、予測に必要となる切削抵抗係数を導出し、切削抵抗の予測値を求めるプログラムである。本研究では、2で得られた工具の接触角度と工具切り込み量をこのプログラムへ入力し、加工時の切削抵抗を予測する。

## 4. 実証実験

### 4.1 実験条件

以下表1の加工条件において、40mm×40mm×15mmの直方体のアルミの試験片を2枚刃のソリッドエンドミルで溝加工した場合の切削領域と切削抵抗を求めた。

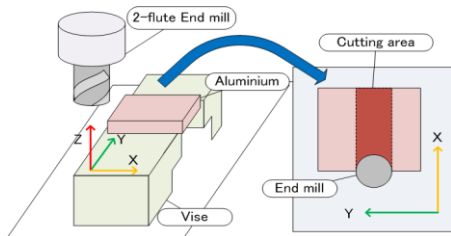


Fig.6 Experimental condition

Spindle rotation speed [rpm]	Feed speed [mm/min]	Tool diameter [mm]	Axial Depth [mm]	Tool twist angle [deg]
3000	90	10	0.5	30

Table.1 Machining conditions

### 4.2 実験結果

実験の結果、対象物の3次元点群と工具の切り取り角度及び軸方向切れ込みの変化が図7~10のように求めた。また、対象物に加わるX方向に加わる切削抵抗の実測値と、Xの移動距離がX=7.7475, X=38.8995の時に測定したデータをもとに予測した値を図9にまとめた。

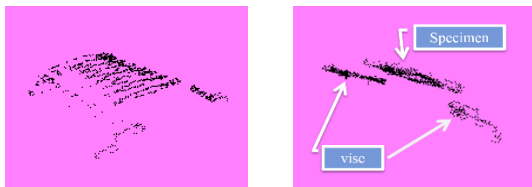


Fig.7 3D reconstruction model

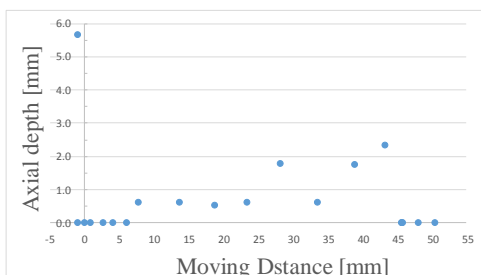


Fig.8 Tool contact angle

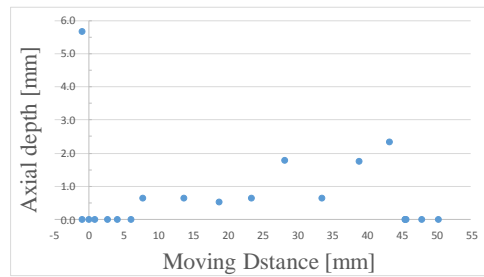


Fig.9 Axial depth

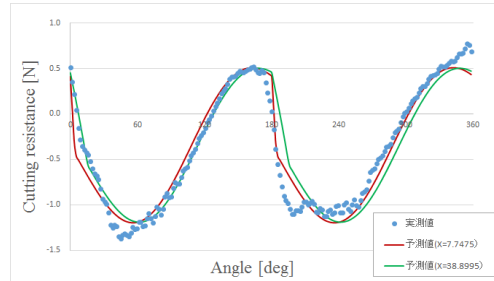


Fig.10 X-direction cutting resistance

図7から、対象物の表面形状を3次元点群で測定することが出来たが、バイスと試験片の表面の点群が微妙に傾いているのが読みとれる。これは、カメラもしくはレーザーの傾きによって発生したもので、キャリブレーション時及び測定時にこれらの傾きをなくせば解決すると考えられる。

また、図8,9において、最初の1回目は工具と対象物は接触していないにもかかわらず、接触角が180°、切り込みも5.68mmとなっている。この原因としては、点群生成プログラムに工具の取りうる座標の範囲を既知として与えているが、その範囲の設定が甘く、対象物ではなく、フライスのバイスとの干渉判定を返したものと考えられる。さらに、図9の軸方向の切り込みは、実際の切り込み0.5mmに対して、3倍から4倍近い値が返ってきているのが分かる。これは、レーザーの反射や傾きによって実際とは異なった座標に点群をプロットしてしまったため、その分だけ切り込み量が増えたと考えられる。

図10より、予測値は比較的精度良く求められることが出来た。しかし、同一の加工現象であるはずのX=7.7475とX=38.8995の予測値は一致しなかった。これは、今回使用した切削抵抗予測プログラムでは、軸方向切り込み量よりエンドミルの薄刃要素を計算、そこから遅れ角を計算で導出しているため、軸方向切り込みの値が大きくなれば、遅れ角も大きくなっていくためである。今回は図8で実測による軸方向切り込みがX=38.8995の方が大きな値であったため、X=7.7475よりも遅れた角度で切削抵抗が予測されたと考えられる。

## 5. 結言

### 5.1 まとめ

本研究では、光切断法による除去領域推定と推定された除去領域における切削抵抗を予測するシステムを開発した。これにより、被切削物の事前測定なしに工具に作用する切削抵抗を予測することが出来た。

### 5.2 今後の課題と展望

現時点では、溝加工において単純な直方体の対象物での切削領域と切削抵抗を求めることが出来たが、複雑な形状ではまだ十分にそれらを求めることが出来ていない。そのため、より詳細な点群を取得し、工具との接触位置を正しく求める方法の開発することが今後の課題となる。

### 参考文献

- 1) OpenCV プログラミングブック 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック製作チーム 著
- 2) 赤木 知洋, 金子 順一, 堀尾 健一郎「切削抵抗予測における予測パラメータの自動推定システムの開発」2014年度精密工学会秋季大会講演論文集, 669-670