

Haptic Device を用いた エンドミル加工の切削力体験システムの開発

電気通信大学 ○本多寿矢, 電気通信大学大学院 ◎森重功一

要旨

本研究は、3軸制御エンドミル加工の切削力を体験できるシステムの開発を目的としている。仮想空間内の物体を操作できる力覚呈示装置によりエンドミルを操作し、モデルを加工するときに作用する切削力を計算する。切削力に対応した力覚をフィードバックすることにより、アップカットとダウンカット、溝加工と側面加工など、エンドミルの使い方による切削力の違いが力覚として体験できることを確認した。

1. 序論

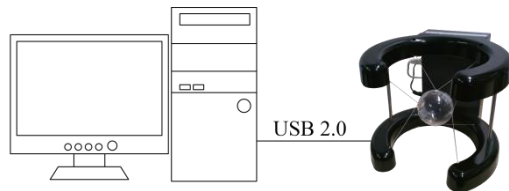
近年の工作機械は電子化が進み、CNCによって高精度な製品が大量に生産されるようになった。NC加工に必要なNCデータはCAMを用いて作成されるが、工具経路や工具姿勢が最適かを判断するためには知識や経験を要する。

これまでに、Haptic Device (HD) を工作機械の操作インタフェースとして用いることを提案し、Voxelモデルを用いて加工状況を動的に描画する機能や、簡易的な切削感覚を呈示する機能、工具と被削材の干渉回避機能など、作業者が直感的に工作機械を操作する機能が開発されてきた¹⁾。

本研究では、3軸制御エンドミル加工に対して、工具経路や工具姿勢を決定するための指針として活かすことのできる、切削力体験システムの開発を目的としている。ここでは、エンドミルをHDで操作して除去されたVoxelから切削状況を見積もり、加工中に作用する切削力を計算し、切削力に対応した力覚をフィードバックする手法を提案する。

2. システムの構成

開発したシステムの構成を図1に示す。HDとPC内の仮想工具を同期させることにより、切削力シミュレーションおよび力覚の呈示をすることができる。HDは、東京工業大学精密機械工学研究所の佐藤研究室が開発した、力覚6自由度を持つSPIDAR-GCCを使用している。



PC for controlling Haptic Device
Fig.1 System configuration

3. Voxelを用いた加工状況の表示

本研究で開発したシステムの概観を図2に示す。本システムでは、HDと同期する仮想空間内の工具と被削材のモデルを、OpenGLに準拠したクラスライブラリであるGLUTを用いて描画している。

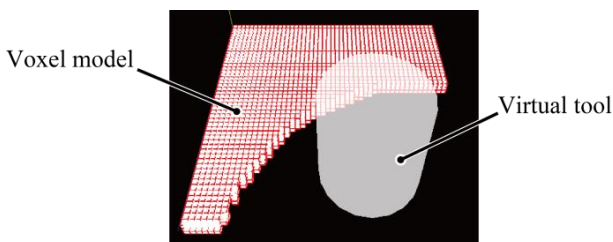


Fig.2 Objects in virtual space

被削材はVoxelモデルを用いて表現している。Voxelモデルの精度はVoxelの分解能に依存しており、分解能を上げると処理するデータ量が指数関数的に増加する問題がある。

Voxelの分割方法には、全てのVoxelを同じ大きさで構成する方法と、八分木法を用いて部分ごとに異なる分解能のVoxelで構成する方法がある。本研究では、被削材をリアルタイムに描写し、同時に切削力の計算を行う必要があるため、Voxelモデルを同じ大きさのVoxelで分割し、構成することにした。

4. 切削力の導出

本研究では、切削力を力覚として即座にフィードバックする必要があるため、ねじれ角による複雑な計算が簡単な数式で表現され、現実的な計算時間と精度で切削力を求めることができる瞬間切削力モデルを用いた。

図3に示すように、エンドミルを微小薄板要素に分割して、各要素の切れ刃に作用する切削力を計算し、足し合わせることで、エンドミルに作用する切削力を求める。

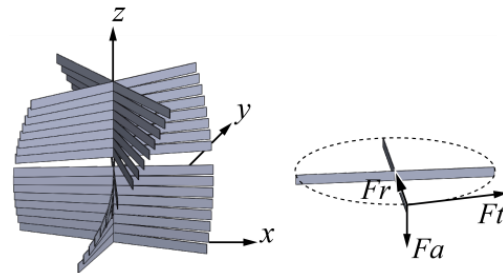


Fig.3 Sliced endmill model

以下に、切削力を計算するための参考に用いた瞬間切削力モデルを示す²⁾。

$$\begin{cases} dF_t(\theta, z) = [K_{te} + K_{tc}h(\theta, z)]dz & (1) \\ dF_r(\theta, z) = [K_{re} + K_{rc}h(\theta, z)]dz & (2) \\ dF_a(\theta, z) = [K_{ae} + K_{ac}h(\theta, z)]dz & (3) \end{cases}$$

ここで、 $dF_t(\theta, z)$ は切れ刃接線方向、 $dF_r(\theta, z)$ は工具半径方向、 $dF_a(\theta, z)$ は工具軸方向の瞬間切削力をそれぞれ示しており、 $h(\theta, z)$ は切り込み厚さ、 dz は微小薄板要素の厚さを表している。 $K_{te}, K_{tc}, K_{re}, K_{rc}, K_{ae}, K_{ac}$ は、2次元切削実験において、切り込み厚さを様々に変化させて計測した各切削力から求められる。本研究では、Al 7075-T6を対象とした2次元切削実験から求めた切削係数を切削力の計算に使用した³⁾。

上記の各瞬間切削力を利用して、 $dF_x(\theta, z)$ を工具送り方向、 $dF_y(\theta, z)$ を工具軸方向、 $dF_z(\theta, z)$ を $dF_x(\theta, z)$ と $dF_y(\theta, z)$ の外積を取った方向とした瞬間切削力の式は、以下のように表すことができる。

$$\begin{cases} dF_x(\theta, z) = -[(K_{tc}h(\theta, z) + K_{te}) \cos \theta \\ \quad + (K_{rc}h(\theta, z) + K_{re}) \sin \theta]dz & (4) \\ dF_y(\theta, z) = -[(K_{tc}h(\theta, z) + K_{te}) \sin \theta \\ \quad + (K_{rc}h(\theta, z) + K_{re}) \cos \theta]dz & (5) \\ dF_z(\theta, z) = -[K_{ac}h(\theta, z) + K_{ae}]dz & (6) \end{cases}$$

本研究では、切り込み厚さを被削材の Voxel モデルから求めて切削力を計算している。工具切れ刃のすくい面を平面で近似し、図 4 に示すように、工具回転角 θ の関数として工具軸を中心に回転掃引した時、切れ刃によって除去される Voxel の座標から、 $h(\theta, z)$ が求められる。さらに、切れ刃のねじれ角による遅れ角 $\Delta\theta$ を考慮すると $h(\theta + \Delta\theta, z)$ が求められ、微小薄板要素ごとの微小切削力が計算できる。これらの微小切削力を足し合わせることで、エンドミルに作用する切削力を求めることができる⁴⁾。

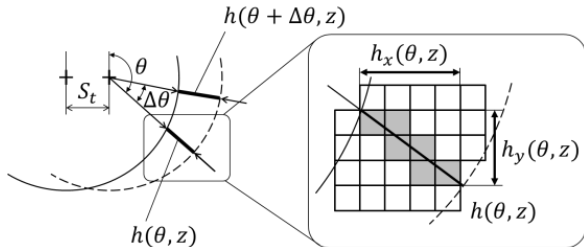


Fig.4 Chip thickness estimated by voxel

5. Haptic Device に対する力覚の出力

計算される切削力の範囲と HD で呈示できる力覚の範囲は異なるため、切削力を補正して HD に出力する必要がある。また、エンドミルの切削は断続的であるため、呈示される力覚も断続的になることや、切り込み厚さが大きくなる場合、切削力や力覚が非常に大きくなることから、HD の操作に支障をきたす可能性がある。そのため、HD に出力する切削力に対して、補正を行う必要がある。

断続的な切削力の補正には、単純移動平均を用いた。移動平均によって切削力が平滑化され、比較的滑らかな力覚が呈示されるようになる。単純移動平均は、直近の値を平均することによって求められる。以下に、単純移動平均の計算式を示す。

$$F_M = \frac{f_M + f_{M-1} + \dots + f_{M-n+1}}{n} \quad (7)$$

ここで、 F_M は単純移動平均を施した切削力、 $f_M \sim f_{M-n+1}$ は n 個の切削力の値である。

過大な切削力に対しては、一定の範囲内では比例関係を保つように増減させ、しきい値を越えた時に根号を施した値となるように補正を行った。

6. ケーススタディ

算出した切削力に適切な補正が施されていることを確認するため、Al 7075-T6 を被削材として、図 5 に示すような側面加工のシミュレーションを行った。切削条件を表 1 に示す。被削材の Voxel モデルから計算した、図 5 に示す A から B の範囲における切削力と、それを補正した切削力のグラフを図 6 に示す。図 6(a) は計算した切削力、図 6(b) は図 6(a) の切削力に平滑化処理を施したもので、図 6(c) は図 6(b) の切削力を HD に出力できるように補正したものである。

図 6(a) と図 6(b) の各切削力を比較すると、断続的であった切削力が連続的な切削力になっていることが分かる。また、図 6(b) と図 6(c) の各切削力を比較すると、HD の出力に適した大きさに補正されていることが確認できる。

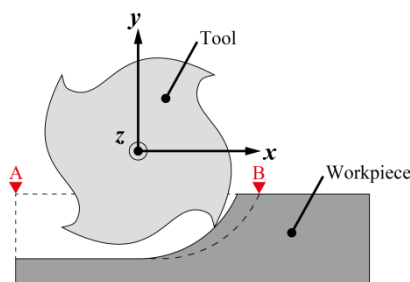
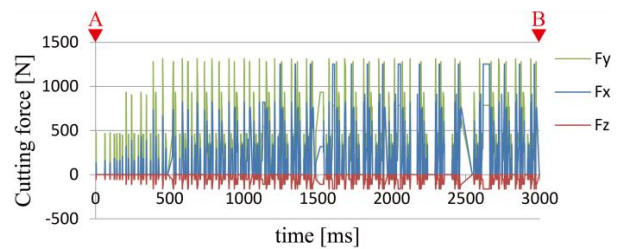


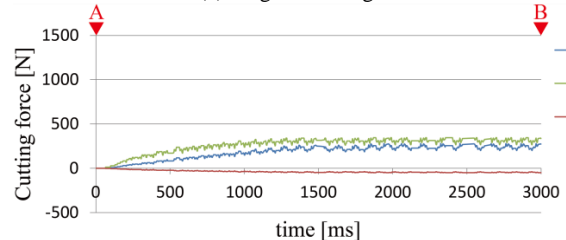
Fig.5 Simulation of side milling

Table 1 Cutting conditions

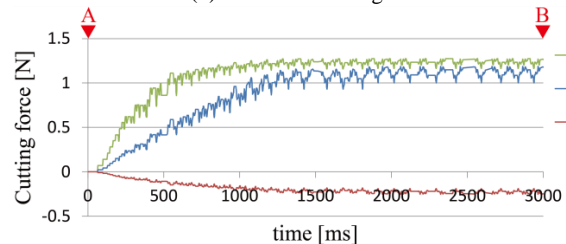
| Workpiece data | | Al 7075-T6 |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------|
| Tool data | Type | Square end mill |
| | Diameter [mm] | $\phi 20$ |
| | Flute length [mm] | 60 |
| | Helix angle [deg.] | 30 |
| | Number of flutes | 4 |
| Cutting condition | Cutting direction | Down cut |
| | Axial depth of cut [mm] | 3.0 |
| | Radial depth of cut [mm] | 6.0 |
| | Spindle speed [min^{-1}] | 1000 |
| | Feed per tooth [mm] | 0.10 |



(a) Original cutting force



(b) Smoothed cutting force



(c) Modified cutting force

Fig.6 Comparison of cutting force

7. 結論

本研究では、3 軸制御エンドミル加工の切削力体験システムの構築を目的として、エンドミルを HD で操作して除去された Voxel から、エンドミルの一刃当たりの切削状況を見積もり、加工するときに作用する切削力を計算した。さらに、求めた切削力を適切な大きさに補正して、力覚をフィードバックする手法を提案した。グラフによって断続的な切削力が HD へ出力できる力覚に補正できていることを確認し、力覚を得ることが困難な 3 軸制御エンドミル加工における切削力を体験できることを示した。

参考文献

- 1) 森重功一, 山本良輔: Haptic Device を用いた多軸制御工作機械操作インターフェイスの開発 (第 1 報, 切削感覚の呈示と工具干渉の回避), 日本機械学会論文集(C 編), 75, 752, (2009), 423.
- 2) J.Tlusty and P.MacNeil: Dynamics of Cutting Forces in End Milling, CIRP Annals, Vol.24/1, (1975), 21.
- 3) 中本圭一: Excel で学ぶ生産工学ソフトウェアの基礎, 日刊工業新聞社, (2011), 91.
- 4) 長谷川輝人, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 被削材のボクセルモデルを用いたエンドミル加工の切削力シミュレーション - 第 1 報: ボクセルを用いた実切込み厚さの計算 -, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, 163, (2014), 699.