エンドミル加工における干渉回避*

Interference Avoidance in Milling Processes

森重功一**

Koichi MORISHIGE

Key words end mill, interference avoidance, tool path, 5-axis controlled machining, operation interface

1. はじめに

マシニングセンタなどによる加工において、種類や形状が多様で自由度が高いエンドミルは、金型や部品などの3次元形状の成形に多用されている。一般的に、エンドミル加工のための工具経路の計算には、目的の加工方法をサポートしたCAMソフトウェアを選定して、利用することになる。CAMソフトウェアが処理する計算は複雑なものが多いが、その中でも加工中に生じる可能性があるさまざまな干渉を予想して回避するための処理は不可欠なものである。本稿では、エンドミル加工における干渉の扱うための処理やその応用例について、具体的な事例を示しながら概説する。

2. 干渉を考慮した工具経路の計算

2.1 工具・工作物間の干渉回避

3軸制御加工の場合は、エンドミルやホルダの形状を反映した干渉回避処理がすでに実用化されている。代表的な手法としては、図1に示す逆オフセット法の活用がよく知られている。逆オフセット法は、まず、エンドミルを工具中心点の周りに180度回転させた逆形状を考え、工具中心点が常に目標形状の表面に存在するように保ちながら移動させることによって掃引形状を計算する。得られた掃引形状は、工具が製品形状を加工するときに工具中心点が存在し得る最下面となるため、この面より上方に工具中心点が存在するように経路を計算することにより、目標形状に対する工具干渉を防ぐことができる¹⁾。

逆オフセット法は、工具軸がZ軸方向に限定されてい

る3軸制御加工に対しては有用であるが、工具軸方向を任意に与えることができる同時5軸制御加工に適用することは難しい。そのため、暫定的に生成した工具経路の全ての工具姿勢に対して干渉の有無を確認して、干渉のある工具姿勢のみを修正する方法³⁾⁴⁾や、各切削点において事前に計算した干渉のない工具姿勢の候補の中から工具姿勢を順次選定することによって干渉のない工具経路を生成する手法⁵⁾などが提案されてきた。

図1 逆オフセット法を利用した3軸制御加工経路の生成²⁾

図2 市販のCAMソフトウェアの工具干渉回避機能（株式会社C & G システムズCAM-TOOL）

*原稿受付 平成23年5月18日

**正会員 電気通信大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻（東京都調布市調布ヶ丘1-5-1）

森重功一

1998年電気通信大学大学院博士後期課程修了、博士（工学）、同大学助手、講師、助教授を経て、2007年4月より准教授。専門は、CAD/CAM、生産システム、知能化工作機械。URL

<http://www.ims.mce.ucc.ac.jp/>

現在の主要なCAMソフトウェアの5軸制御加工機能は、工具と工作物の間に生じる干渉については考慮しているものがほとんどである。最近では、図2に示すように、予想される干渉を考慮して、干渉が生じる直前ではなく、徐々に工具姿勢を変化させる機能も提供されるようになってきた。工具姿勢の最適化や計算時間の短縮などの課題はあるものの、十分実用に耐える工具経路が計算できるようになっている。

2.2 機械構造干渉を考慮した5軸加工経路の生成

今後の5軸制御加工用CAMソフトウェアには、より多様な干渉問題を考慮した機能の拡充が望まれる。例えば、図3に示すようなテーブルや主軸などの機械構造どうしの干渉については、現行のCAMソフトウェアでは考慮されていない。そのため、機械構造どうしが干渉する工具経路が出力されてしまう恐れがある。

各工作機械メーカーは、NCプログラムによる自動運転や、ハンドルやボタンによる手動運転において、機械の実動作に先行してNC装置内部で機械構造の干渉の有無をリアルタイムで監視し、衝突が起こる前に機械を安全に自動停止させる機能をすでに実用化している⁶⁾⁷⁾。

機械構造どうしが衝突する事故は、加工準備作業における手動操作時に起こる場合が多いと聞く。そのため、衝突が生じないことを保証するこのような機能は極めて有用で

あり、今後標準化が進むものと思われる。

一方、自動運転時においては、衝突そのものについては回避できるものの、問題が確認されたプログラムの修正は困難である。NCデータに変換する前の工具経路を計算する段階から、このような衝突の問題を考慮する必要がある。

障害物との衝突を回避しながら移動する物体の動作を計画する手法として、コンフィギュレーション空間(Configuration Space, C-Space)の利用が提案されてい

図4 さまざまな干渉を考慮した2次元C-Space

図3 工具干渉と機械構造干渉

図5 機械構造干渉を考慮した2次元C-Spaceの生成例

(a) 従来の手法：構造干渉あり

(b) 開発した手法：構造干渉なし

図6 複合加工機を想定した加工シミュレーション

る⁸⁾。C-Space は、多関節ロボットの動作計画への適用を想定して考案されたものであるが、多軸化された工作機械は多関節ロボットと同等と考えられるため、その加工動作の計算に C-Space を適用することは有効であると考えられる⁹⁾。

C-Space を利用して機械構造の干渉を回避した工具経路生成の一例を示す。図 4 は、1 切削点において計算した 2 次元の C-Space であり、原点からの距離が切削点における法線に対する工具の傾斜角度 θ に、原点周りの角度が法線を軸とした工具の回転角度 φ に対応している。まず、機械の可動範囲を超える工具姿勢に対応する領域を「実現不可能領域」として候補から除いた後、機械構造干渉に対応する「機械構造干渉領域」を計算する。さらに、工具と工作物の干渉に対応する「工具干渉領域」を計算して残った、取り得る工具姿勢に対応する「有効領域」から工具姿勢を選定していくことにより、想定される全ての干渉を回避した工具経路を得ることができる。

同一の切削点において計算した C-Space を図 5 に示す。構造干渉を考慮した従来の手法では、実現不可能領域と工具干渉領域が表現されているが、提案した手法では機械構造干渉領域も表現されている。従来の手法では構造干渉が生じる工具姿勢が出力されてしまうが、提案した手法では構造干渉を回避した工具姿勢を得ることができる。

生成した工具経路を NC データに変換し、機械シミュレーションソフトウェアによる検証を行った。シミュレーションの結果を図 6 に示す。構造干渉を考慮していない従来の手法で算出したデータではテーブルと主軸の干渉が確認されたが、提案した手法で算出したデータでは構造干渉や工具干渉が生じることなく、最後まで加工を行うことができた¹⁰⁾。

3. 力覚呈示装置を利用した工作機械操作 インタフェース

NC 加工の場合は、機械の複雑な動きを実現するために、CAM ソフトウェアなどで作成した NC プログラムを事前に用意して用いるのが一般的である。そのため、前述したような独自の手法を適用した工具経路の自動生成に関する研究が多くなされてきた。

一方、試作品や金型などの一品ものの加工の場合は、些細な加工の場合でも CAM ソフトウェアによる作業の段階から検討しなければならず、効率が良いとは言いがたい。NC プログラムを用いずに加工する場合は、機械に付属しているインタフェース機能を利用して、機械を直接操作することになるが、現行の工作機械の操作インタフェースは、当初から機械に装備されている各軸に対応するボタンやハンドルから大きな変更はなされず、多軸化が進む現在の工作機械の自由度を反映しているとは言いがたい。

以上のような背景から、作業者が機械の複雑な特性を意識することなく容易に操作できるように、作業者と工作機械の間を取り持つインタフェース機能について検討する必

要があると考ええる。

物体の位置と姿勢を呈示するためのインタフェース機器として、バーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) の分野で研究されている力覚呈示装置をあげることができる¹¹⁾¹²⁾。力覚呈示装置は、仮想空間を操作するための道具であり、ディスプレイなどに表示された計算機内の仮想オブジェクトに触るなどの操作をすると、衝撃や反動、振動、惰性、慣性などの物理的な力覚が作業者に伝達され、重さや硬さとして感じるができる。

現在では、安価なシステム¹³⁾や、仮想空間における干渉問題をリアルタイムで処理できる干渉計算ライブラリ¹⁴⁾が提供されるなど、力覚呈示装置を用いたアプリケーションの開発が容易になり、その応用は他の分野へも広がってきている。工具経路生成などの作業設計に対する力覚の援用については、すでにいくつかの先進的な試みがなされており、独自に試作した力覚呈示装置を 3 軸制御加工や 5 軸制御加工のための NC プログラミング¹⁵⁾¹⁶⁾やトレーニング¹⁷⁾などに応用した事例が報告されている。

図 7 は、力覚提示装置を応用した工作機械操作インタフェースの運用予想図である。システムは、5 軸制御工作機械、工作機械を制御する Open CNC を搭載したパーソナルコンピュータ (Personal Computer, PC)、ペン型のスタイラスをもつ力覚呈示装置で構成されている。まず、PC 内の仮想空間に工作物の 3 次元モデルを定義し、ディスプレイに表示させる。続いて、仮想工具も工作物と同様に定義してディスプレイに表示させ、それをスタイラスで操作することにより、仮想工具と工作物の位置関係を呈示する。仮想工具が工作物に接触すると、スタイラスを通して反力が返されるため、作業者は工具を工作物の内部に進入させることはできない。工具中心点などの座標値は、モデル境界などを参照して正確な値が出力される。出力されたスタイラスの動きを 5 軸制御工作機械と同期させて加工を行う¹⁸⁾。

図 8 に示すのは、2010 年 10 月 28 日 (木) から 11 月 2 日 (火) まで東京ビックサイトで開催された第 25 回日本国際工作機械見本市 (JIMTOF2010) において実施したエ

図 7 力覚呈示装置を利用した 5 軸制御工作機械操作インタフェースの運用予想図

図8 二つの力覚呈示装置を利用した加工インタフェース

エンドミル加工インタフェースのデモンストレーションの様子である。工具を操作するための従来からの呈示装置に加え、工作物を操作するための装置を追加している。左手で位置・姿勢を決めた工作物に対して、右手で操作する工具によって加工するという、彫刻などのような手作業に近い操作感覚を実現している。簡単な説明をするだけで子供でも直感的に操作できるなど、非常に好評であった。

現在はいずれのシステムも、PCにつなげられた力覚呈示装置を操作して5軸制御加工の工具経路をオフラインで生成し、加工シミュレーションによって出力された工具経路の妥当性について評価している。今後は、工作機械との接続について工作機械メーカーやNCメーカーと連携しながら検討を進め、本来の目的である新しい加工インタフェース機能を実現する予定である。

4. お わ り に

以上、エンドミル加工に伴う作業設計において扱われている干渉問題について、関連する技術の現状や独自に取り組んでいる研究事例について解説した。近年、工作機械の多軸・複合化が進み、エンドミル加工における工具の動きも複雑になりつつある。機械加工における干渉問題は今後ますます複雑になり、その重要度も増していくと予想される。精度や処理速度における要求も、さらに高度なものになる。関連する研究に携わる者の一人として、さらなる機能の開発や拡充について尽力していきたい。

本稿の内容が、エンドミル加工やCAMソフトウェアの利用や開発に関係する方々の今後の活動に対して少しでも参考になれば望外の喜びである。

参 考 文 献

- 1) 近藤司, 岸浪建史, 斎藤勝政: 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**, 5 (1988) 971.
- 2) 竹内芳美: パーソナル3次元CAD/CAM, 工業調査会, (1996) 88.
- 3) 竹内芳美, 清水弘幸, 出村健, 渡辺隆弘, 伊藤哲也: ソリッドモデルに基づく5軸制御加工, 精密工学会誌, **56**, 11 (1990) 2063.
- 4) 森重功一, 加瀬究, 竹内芳美: 2次元 Configuration 空間を用いた5軸制御加工における工具干渉回避法, 精密工学会誌, **62**, 1 (1996) 80.
- 5) K. Morishige, Y. Takeuchi and K. Kase: Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, **121**, 1 (1999) 144.
- 6) 深谷安司: 衝突防止機能を搭載したインテリジェント NC 装置, 機械と工具, **49**, 2 (2005) 19.
- 7) 西村英明: 部品加工プロセスを革新するダイレクトマシニング, 機械と工具, **53**, 2 (2009) 63.
- 8) T. Lozano-Perez: Spatial Planning: A Configuration Space Approach, IEEE Transactions on Computers, **32**, 2 (1983) 108.
- 9) 森重功一: コンフィギュレーション空間に基づいた5軸制御加工のための工具経路生成に関する研究, 精密工学会誌, **76**, 8 (2010) 871.
- 10) 森重功一, 上江州亘, 前田未智人: 機械構造の干渉を考慮した5軸制御加工用工具経路生成法, 型技術者会議2010講演論文集, (2010) 188.
- 11) G. Burdea and P. Coiffet: Virtual Reality Technology, 2nd Edition, WILEY-INTERSCIENCE, (2003).
- 12) G. Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, WILEY-INTERSCIENCE, (1996).
- 13) 例えば, Sensable Technologies, Inc., "PHANTOM OMNI-Sensible", Sensable, (online), available from <http://www.sensible.com/haptic-phantom-omni.htm>, (accessed 2011-5-17).
- 14) Y. Tamura, N. Mizuguchi, S. Matsumoto and H. Ueki: Construction of Virtual Assembly System with Real-Time Collision Detection, Proceedings of 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence 2007, (2007) 284.
- 15) 高橋秀智, 金井理: 自由曲面用 NC プログラミングのための人工現実感システムの研究, 精密工学会誌, **62**, 1 (1996) 70.
- 16) M. Balasubramaniam, S. Ho, S. Sarma and Y. Adachi: Generation of Collision-free 5-axis Tool Paths Using a Haptic Surface, Computer-Aided Design, **34**, 4 (2002) 267.
- 17) F. Crison, A. Lecuyer, D. Huart, J.-M. Burkhardt, G. Michel and J.-L. Dautin: Virtual Technical Trainer: Learning How to Use Milling Machines with Multi-Sensory Feedback in Virtual Reality, Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality, (2005).
- 18) 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ースの開発 (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) 1187.