NCプログラムを必要としない機械加工のための 仮想倣い加工システムの開発*

(自律型 NC 工作機械のための実時間工具経路生成)

白瀬 敬一^{*1}, 近藤 貴茂^{*2}, 岡本 満^{*3}
若松 栄史^{*1}, 荒井 栄司^{*1}

Development of Virtual Copy Milling System to Realize NC Programless Machining (Real Time Tool Path Generation for Autonomous NC Machine Tool)

Keiichi SHIRASE^{*4}, Takashige KONDO, Mitsuru OKAMOTO,
Hidefumi WAKAMATSU and Eiji ARAI

^{*4} Osaka University, Dept. of Manufacturing Science, Yamada-oka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

NC programless machining which is realized by the virtual copy milling system have been demonstrated. In the virtual copy milling system which is developed in this study, a stylus and a master model in copy milling are defined as geometrical surface models, the stylus motion corresponding to the tool motion is simulated by applying copy milling principle. This method is simple enough to generate the tool motion in real time, because it detects only the collision between the stylus and the master model which are defined. Experimental cutting have been succeeded to show that the virtual copy milling system is able to perform NC programless milling of sculptured surface. The real time tool path generation accomplished by this system aims to be used for the adaptation of cutting conditions such as depth of cut and feed speed to maintain stable machining. The adaptation of cutting conditions is an important function to realize an autonomous NC machine tool towards 21st century.

Key Words: Numerical Control (NC), Machine Tool, Milling, Virtual Copy Milling, NC Programless Machining, Real Time Tool Path Generation, Autonomous NC Machine Tool

1. 緒 言

NC 工作機械は機械加工の自動化・高精度化に非常に貢献してきた。さらに CAM が広く普及し、CAD で設計された製品形状データから、複雑な NC プログラムが効率良く作成できるようになると、多軸化・複合化による工程集約も可能となっている。しかし、NC 工作機械が NC プログラムで運転されている限り、工具経路や切削条件に問題があっても修正することができず、工具の損傷やびり振動の発生といった加工中の障害に対処することができない。これは、現状の NC 工作機械に加工状況をフィードバックする機能がなためであり、21 世紀に向けた NC 工作機械の自律化・知能化を実現する上で考慮すべき課題である。

図 1 は著者らが考える自律型・知能型の NC 工作機械の概念をまとめたものである。図 1(a)は現状の NC 工作機械で、前述したように加工状況をフィードバックする機能を持たない。図 1(b)は適応制御された NC 工作機械で、切削力や主軸の負荷をフィードバックしながら工具の送り速度や主軸回転数を制御することができる。しかし、この場合も NC プログラムによる運転が前提であり、加工状況によって工具経路を修正することはできない。

図 1(c)が提案する自律型・知能型の NC 工作機械である。実時間工具経路生成の機能を備え、加工状況によって工具経路、すなわち切り込みやピックフィードといった切削条件を修正することができる。従って、加工状況の変化に柔軟に対応できるようになる。また、加工中に工具経路を生成するので、結果として NC プログラムを必要としない自律型の NC 工作機械が実現できる。

切削シミュレーション¹⁾は、プリプロセスあるいはインプロセスで切削力や加工誤差を予測し、予測結果は工

Fig.1 Concept of autonomous NC machine tool proposed

* 原稿受付 1999 年 8 月 20 日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

^{*2} 大阪大学大学院。

^{*3} 大阪機工(株) (〒664-0831 伊丹市北伊丹 8-10)。

E-mail: shirase@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

具経路生成, 適応制御, モニタリングに反映され, NC 工作機械の知能化に貢献できる。

そこで本論文では, 工具経路を実時間で生成するために, 倣い加工の原理を応用した仮想倣い加工システムを開発した。倣い加工はもともと NC プログラムを必要とせずに, スタイルスが機上のマスタモデルを倣いながら工具経路を実時間で制御している。この原理は非常に単純で, パソコン上に構築した仮想倣い加工システムでも, 工具経路を実時間で生成しながら倣い加工が実現できることを切削実験で検証した。仮想倣い加工システムでは機上のマスタモデルが不要で, CAD で設計された製品形状データから, NC プログラムを必要とせずに機械加工が実現できるようになる。

2. 実時間工具経路生成

実時間で工具経路を生成する手法は数多く提案されている^{2,3)}。しかし, こうした手法は工具経路データ生成に要する時間の排除と, 製品の複雑化・高精度化に伴う工具経路データの肥大化に対処することが目的である。すなわち, 工具経路データ生成から機械加工までのトータルな加工時間を短縮して生産性向上を実現することと, 膨大な工具経路データを含む NC プログラムを生成することなく高速・高精度の NC 加工を実現することが目的とされている。

例えば鈴木らは逆オフセット法と並列処理による実時間工具経路生成手法^{2,3)}や, サーボ系の補間処理も考慮に入れた金型の実時間加工システム⁴⁾を開発している。入口らはオフセット面を用いない曲面の細分割データから工具経路を生成する手法を提案している⁵⁾。しかし, これらの研究は CAM の研究がベースとなっており, データ表現やアルゴリズムを工夫することで工具経路生成の実時間処理を実現したもので, 送り速度や切り込みといった切削条件を加工中に変更する機能は考慮されていない。これに対して本研究では, 送り速度や切り込みといった切削条件を加工中に更新しながら加工状況の変化に柔軟に対応することを前提としており, 倣い加工の原理を利用した実時間工具経路生成を実現して, 切削実験で検証した点が特徴といえる。

Fig.2 Scanning-line mode in copy milling

3. 倣い制御による工具経路生成

倣い加工は NC プログラムを必要とせずに, スタイルスが機上のマスタモデルを倣いながら工具経路を実時間で制御している。そこで倣い加工の原理をそのまま計算機内でシミュレートして, 工具経路を制御することを考えた。同様に, 神谷らも倣い加工の原理に注目して CAM を開発し^{6,7)}, 工具経路を生成している。

3.1 仮想倣い加工 倣い動作には走査倣いモードや輪郭倣いモードといった動作モードがあるが, 本研究では図2で示すように, 走査倣いモードを取り扱うことにする。この場合スタイルスの変位や移動方向は, スタイルスの中心軸と移動軸を含む 2 次元の動作平面で考えることができる。

倣い加工ではスタイルスが機上のマスタモデルと接触して生じる変位 ε の大きさと方向に基づいて倣い制御が行われるが, 仮想倣い加工では, 計算機内にモデル化された仮想スタイルスと仮想マスタモデルとの最大干渉量を変位 ε と見なして倣い制御を行う。図3にスタイルスの変位と干渉量との関係を示す。

Fig.3 Analogy between displacement and collision

Fig.4 Detection of maximum collision ε

Fig.5 Detection of resultant collision ε

干渉量は動作平面に投影された仮想スタイラスを表す円と、仮想マスタモデルを表す微小線分との幾何学的な関係から、図4に示すようにZ軸を基準にした角度 θ ごとに計算している。試作した仮想加工システムでは $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ の範囲で1度ごとに180点の干渉量を計算し、干渉量が最大となる角度 θ をスタイラスの変位の方向に、その方向の干渉量 ε を変位量に決めている。

また、スタイラスがマスタモデル上を倣いながら移動していくと2点で接触する場合が生じる。この場合は、2点での干渉量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ の大きさと方向を考慮しながら合成することによりスタイラスの変位量と方向を求めることができる。図5に示すように、ベクトル $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を隣り合う2辺とする3角形に外接する円を描くと、その2辺が成す頂点から円の中心を通る直径に相当するベクトル ε が求めたいスタイラスの変位量とその方向に相当している。

さらに、ボールエンドミルによる加工を前提とする円状仮想スタイラスに対して、スクウェアエンドミルによる加工を考慮するための角状仮想スタイラスについても変位量とその方向を検出することを考えた。ここでは、幾何学的な正確さよりもアルゴリズムをできるだけ

簡素化することにし、図6で示すように角度 θ ごとに計算される干渉量 $\varepsilon(\theta)$ を、工具中心から工具外形までの距離 $r(\theta)$ で規格化して $\varepsilon'(\theta)$ を計算している。規格化された干渉量 $\varepsilon'(\theta)$ が最大となる角度 θ をスタイラスの変位の方向に、その方向の干渉量 $\varepsilon(\theta)$ をスタイラスの変位量に決めている。これにより、規格化以外の処理は円状仮想スタイラスの場合と同様に行うことができる。

このように仮想加工では、計算機内にモデル化された仮想スタイラスと仮想マスタモデルとの干渉量から、スタイラスの変位量とその方向に相当するベクトル ε を計算することができ、これに基づいて倣い制御を行うことができる。

3.2 倣い制御 倣い加工では、機上のマスタモデルと接触するスタイラスの変位量 ε が、常に基準変位量 ε_0 と等しくなるように制御される。図7に示すように、スタイラスの送り速度 V は、スタイラスの法線速度成分 V_N と接線速度成分 V_T とのベクトル和として決定される。また、スタイラスの法線速度成分 V_N と接線速度成分 V_T は、 $\varepsilon_d = \varepsilon - \varepsilon_0$ を用いて次式で計算される⁸⁾。

$$V_N = G_N \varepsilon_d \quad (1)$$

$$V_T = V_C - G_T |\varepsilon_d| \quad (2)$$

ここで、 G_N は ε_d に対する法線速度成分 V_N を決定する V_N ゲイン、 G_T は ε_d に対する接線速度成分 V_T を決定する V_T ゲインと呼ばれ、 V_C は予め設定された指令速度である。 ε_d と V_N, V_T との関係をグラフにすると、図8のように示される。

スタイラスの変位量 ε が基準変位量 ε_0 に等しく $\varepsilon_d = 0$ の場合、 $V_N = 0, V_T = V_C$ となって、スタイラスはマスタモデル表面を接線方向に指令速度 V_C で移動することになる。ところが図7に示すように、スタイラスの変位量 ε が基準変位量 ε_0 よりも大きく $\varepsilon_d > 0$ となると、 V_N はスタイラスがマスタモデルから離れる方向に作用し、 V_T は指令速度 V_C から減速されて、スタイラスはマスタモデルの形状に沿うように移動することになる。このように、式(1),(2)で示される非常に簡単な制御則で、スタイラスはマスタモデルの形状に沿って移動することができ、しかも形状が急変する部分ではスタイラスの送り速度が低下し、加工公差が自動的に補償されることになる。

神谷らも倣い加工の原理に注目してCAMを開発しているが^{6,7)}、本研究がNC工作機械を直接制御することを目的としているのに対して、正確な工具経路を生成することを目的としている。このため、式(1),(2)で示される速度ベクトルの変化は考慮されておらず、スタイラスとマスタモデルとの干渉チェックを詳細に行うことで、形状急変部での誤差補正を行っている。

Fig.6 Normalization of collision to detect displacement for square end mill

Fig.7 Feed control in tracing

Fig.8 Variation of V_N and V_T for feed control

3.3 仮想倣い加工システム 以上, 述べてきたように本研究ではNC 工作機械を直接制御することを目的に, 可能な限り単純なアルゴリズムで仮想倣い加工を実現することを考えてきた. そこで, これらのアルゴリズムの有効性を検証するために, 仮想倣い加工システムを開発した.

図 9 に工具径の異なるボールエンドミル, スクウェアエンドミルに対して, 仮想倣い制御で生成された工具経路を比較して示す. いずれの工具も左から右へ移動しており, マスタモデルの形状を倣って正しく工具経路が生成されている様子が分かる. 小径の工具は, マスタモデルの溝部で 4 箇所形状急変部を通過しているが, 正しく溝形状を倣っている. また大径の工具は, マスタモデルの溝部で 2 点で接触するが, 正しい方向に回避しながら倣い動作が継続されている. さらに, ボールエンドミルとスクウェアエンドミルによる工具経路の違いも明確である.

(a) Tool paths for ball end mills

(b) Tool paths for square end mills

Fig.9 Tool path generation for different tool shape

Fig.10 Input GUI of virtual copy milling system

図 10 に仮想倣い加工システムの入力画面を示す. ここでは, 製品形状データ, 被削材形状データ, 工具形状や切削条件, 倣い加工のパラメータを入力する.

製品形状データとしては CAD データを入力できることが望ましいが, 試作システムでは Bezier 曲面で定義された自由曲面を加工形状として取り扱っている. なお, 動作平面上の仮想マスタモデルの形状は, Bezier 曲面から求められる微小線分によって近似した. 被削材形状は直方体としており, その寸法を入力する.

工具形状としては, ボールエンドミルかスクウェアエンドミルを選択し, 工具径を入力する. なお, ここで入力する工具径は仮想スタイラスの直径 D であり, 加工に使用する工具径 d よりも大きな値を入力することで, 残り代 a を考慮した荒加工が実現できる.

$$a = (D - d) / 2 \quad (3)$$

(a) Tool path generation in rough milling

(b) Tool path generation in finish milling

Fig.11 Tool path generation in virtual copy milling

切削条件としては、表面往復倣いか表面一方向倣いかの加工モードを選択し、アプローチや加工中の工具送り速度 V_c 、ピックフィード、Z 軸方向の切り込み量を入力する。Z 軸方向の切り込み量は、荒加工のクランプ倣いにおける工具クランプ量となる。

倣い加工のパラメータとしては、基準変位量 ε_d 、 V_N ゲイン G_N 、 V_T ゲイン G_T 、制御時間間隔 t 、倣いリミットを入力する。制御時間間隔 t は工具位置情報を更新する時間間隔で、倣い制御で計算される工具送り速度 V との積が工具微小移動量 L となる。

$$L = V t \quad (4)$$

図 11 に仮想加工システムで生成される工具経路の例を示す。図 11(a) が荒加工中のクランプ倣いで、加工の進行とともに工具のクランプ位置が $Z_1, Z_2, Z_3 \dots$ と更新されている。図 11(b) が仕上げ加工で、マスタモデルに沿った工具経路が生成されている。仮想加工システムの特徴は、工具送り速度だけでなく、ピックフィードや Z 軸方向の切り込み量といった切削条件を加工中に更新できる点にある。その点で、加工状況をフィードバックしながら切削条件を修正することが可能であり、加工状況の変化に柔軟に対応できる自律型 NC 工作機械への利用に向けた研究を進めている。

以上のシステムは、Microsoft Windows95/98/NT の環境で、Borland C++Builder3 を用いて開発した。

Fig.12 Experimental setup

Fig.13 Experimental virtual copy milling

4. 仮想加工実験

開発した仮想加工システムで NC 工作機械を実際に制御しながら、仮想加工実験を行った。図 12 に実験装置を示す。NC 工作機械は大阪機工の立型マシンニングセンタ VM4-II で、制御装置は FANUC の Series 160i-MA である。仮想加工システムを実行する PC/AT パソコンは、CPU が PentiumII 450MHz、RAM が 128MB、OS が Windows NT で、制御装置とは HSSB と呼ばれる高速データベースで接続されている。仮想加工システムで生成される工具経路情報は、工具微小移動量ごとに NC 指令ブロックに変換され、NC 工作機械を DNC 運転するために出力される。実験に使用した PC/AT パソコンの場合、工具微小移動量を求めるための計算時間は平均で約 4msec であるが、計算時間の変動や NC 指令ブロックへの変換、データ転送に要する時間などを考慮して、工具位置情報を更新する制御時間間隔 t を 16msec として実験を行った。

図 13 に加工状況を図 14 に加工結果をそれぞれ示す。被削材は素材寸法が 76 x 76 x 38 mm のマシナブルワックスである。工具には直径 6mm の高速度鋼、2 枚刃ボールエンドミルを用い、同じ工具で荒加工から仕上げ加工まで行った。加工条件を表 1 にまとめて示す。いずれの加工形状も荒加工に約 12 分、仕上げ加工に約 17 分を要したが、異常なく加工実験を終了することができた。また、加工面を目視した結果でも、加工面は滑らかで傷は認められず、工具送り速度の急変などの実時間制御に起因する問題は見当たらなかった。

(a) Finished shape of Model A

(b) Finished shape of Model B

Fig.14 Example of virtual copy milling

さらに、図 14(a)で示したモデル A について加工形状を測定し、仮想マスタモデルの形状と比較した。加工形状は Mitutoyo の 3 次元測定器 BHN305 で測定しており、図 15(a)に加工形状全体、図 15(b)に加工形状の一部を拡大してその結果を示す。加工精度は送り速度と加工形状の複雑さの影響で変化するが、十分な精度で工具経路が生成されていることが確認できる。

本手法は最適な工具経路を生成するわけではないが、NC プログラムを作成する必要がないために、金型のようない一品生産では生産効率を大きく改善することができる。また、倣い加工と同様、送り速度や切り込みとい

った切削条件を加工中に更新することができる。図 16 は、加工中に工具を後退させて送り速度を変化させた際の工具経路と送り速度の変化を示しており、加工中に切削条件の修正ができることを確認した。

5. 結 言

本論文では実時間工具経路生成のために、倣い加工の原理を応用した仮想加工システムを開発し、実時間で NC 工作機械を制御できることを切削実験で検証した。結果は以下のようにまとめられる。

1. 仮想スタイラスと仮想マスタモデルの干渉量を検出するという単純な方法で、倣い加工の原理を応用した実時間工具経路生成手法を提案した。
2. 仮想加工システムを構築し、実時間で NC 工作機械を制御しながら NC プログラムを必要としないエンドミル加工が実現できることを検証した。
3. 倣い加工と同様に、送り速度や切り込みといった切削条件を加工中に更新できることを確認した。

この結果、加工状況をフィードバックしながら切削条件を修正することが可能となり、加工状況の変化に柔軟に対応できる自律型 NC 工作機械への応用が今後の課題となる。

謝 辞

本研究は平成 11 年度科学研究費補助金(基盤研究 (c) No.11650129) ならびに日本学術振興会・未来開拓学術推進事業プロジェクト「人工知能による協調的シンセシスの方法論」の助成により行われました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Shirase, H. Narita, H. Wakamatsu, E. Arai and K. Iwata, PC Based Virtual Machining Simulator for Autonomous and Intelligent Machine Tool, Proc. of 1998 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, (1998), 1281-1288.
- 2) 鈴木 裕, 山崎和雄, 星鐵太郎, 黒宮義久, 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第 2 報), 精密工学会誌, 53-12, (1987), 1952-1958.
- 3) 鈴木 裕, 黒田 豊, 坂本正史, 元村直行, 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第 3 報), 精密工学会誌, 57-3, (1991), 473-478.
- 4) 鈴木 裕, 是沢宏之, 原横真也, 林 朗弘, 金型型面実時間加工システムの開発, 日本機械学会論文集, 60-577, C (1994), 2900-2905.
- 5) 入口健二, 加藤清敬, 曲面細分割による工具経路生成方法, 精密工学会誌, 64-11, (1998), 1618-1622.
- 6) 神谷昌秀, 島田元浩, 鈴木 裕, 横関俊介, 倣いシミュレーションに基づく CAM システムの開発, 日本機械学会論文集, 61-590, C (1995), 4112-4116.
- 7) 神谷昌秀, 佐藤裕一, 林 朗弘, 鈴木 裕, 倣いシミュレーションに基づく CAM システムの開発 (境界表現法への適用とその高能率加工), 日本機械学会論文集, 63-608, C (1997), 1378-1384.
- 8) FANUC Series 15-MA ならい/デジタイジング機能用捕捉説明書, B-61534/04, ファナック(株), (1989).

	Rough cut	Finish cut
Depth of cut (mm)	3.5	0.5
Cross feed (mm)	3.61	1.0
Rapid feed (mm/min)	2000	2000
Jog feed : V_C (mm/min)	1000	600
V_N gain : G_N	20	20
V_T gain : G_T	1	1
Reference displacement : ε_e (mm)	0.5	0.5
Interval time : t (msec)	16	16

(a) Whole of shape

(b) Part of shape

Fig.15 Comparison of defined and measured shapes

Fig.16 Change of cutting depth and feed speed in experimental cutting