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*

(第2報, 干渉チェックの強化と等高線加工の実現)

中本圭一^{*1}, 白瀬敬一^{*2}, 若松栄史^{*2}
妻屋彰^{*2}, 荒井栄司^{*2}

Development of Virtual Copy Milling System to Realize NC Programless Machining (2nd Report, Improvement of Collision Check and Realization of Contour-Line Machining)

Keiichi NAKAMOTO^{*3}, Keiichi SHIRASE, Hidefumi WAKAMATU,
Akira TSUMAYA and Eiji ARAI

^{*3} Department of Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

An autonomous NC machine tool is required to have several functions, such as the optimization of cutting conditions, and the avoidance of cutting troubles during machining operation. The virtual copy milling system has been developed to achieve these functions. This system based on copy milling principle is able to generate tool paths in real time. In this paper, the collision check between the stylus and the master model to generate tool paths is improved and completed to avoid over cutting. Furthermore, contour-line machining is realized besides scanning-line machining performed in the previous report. Experimental milling is succeeded to show NC programless machining of sculptured surface.

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

1. 緒 言

機械加工の分野では, CAD/CAMの進歩に伴い, 加工形状の設計から, NCプログラムの作成までを一気通貫で行うことが一般的になってきた。また, NC制御装置の性能向上によりNC工作機械は, NCプログラムで指令されたとおりに, より高速に高精度で加工することが可能となっている。しかしこれは, NC工作機械がNCプログラムとして加工前に決められた指令に忠実に従うだけであることを意味する。このために, NCプログラムに基づく現状の機械加工では, 加工状況に応じて切込みやピックフィードを修正することができず工具損傷やびびり振動の発生といった加工中の障害を回避できないという問題がある。こうした問題を解決するためには, 検出される加工状況をフィードバックして切削条件を常に修正し, それに応じた工具経路を実時間で生成する技術を開発しなければならない。またこれらの技術が完成すれば, NCプログラムそのものが不

要となり, NC工作機械の自律化, 知能化が実現できる。これまでも実時間で工具経路を生成する手法は数多く提案されてはいるが¹⁻⁴⁾, 工具経路データ生成から機械加工までの加工時間を短縮することと, 大容量のNCプログラムを生成することなく高速・高精度なNC加工を実現することに主眼が置かれており, 工作機械の自律化, 知能化には結びついていない。

本研究では, 前報⁵⁾で報告したように, もともとNCプログラムが不要な倣い加工に注目して, その倣い加工の原理を計算機内で再現することにより, 実時間で工具経路を生成してNC工作機械を制御できる仮

Fig.1 Tool path generation in virtual copy milling

* 原稿受付 2001年5月15日.

^{*1} 准員, 大阪大学大学院 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1).

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科.

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

仮想加工システムを開発している。その実行画面の一例を図1に示す。前報では走査線加工を対象に工具経路や工具送り速度ベクトル求めるために必要な、仮想スタイラスと仮想マスタモデルの干渉チェックを、図2で示す仮想スタイラスの中心軸と移動軸を含む平面でのみ行っていた。しかし、この手法では干渉チェックが不十分で、加工形状によってはオーバーカットを生じるという問題があった。そこで本報では、干渉チェックを強化してこの問題を解決し、併せて等高線加工にも対応できるようにした。以下にこれらの実現手法を報告する。

Fig.2 A plane for checking collision

2 工具経路

2.1 工具経路パターン

本システムでは、前述したように、計算機内で仮想スタイラスと仮想マスタモデルとの干渉チェックを行い、加工の原理に従って工具経路を生成する。しかし、素材形状から製品形状まで一貫して加工することを考えると、基本となる工具経路パターンを用意しておき、それによって加工を進めていく必要がある。図3に走査線モード、等高線モードのそれぞれについて用意した工具経路パターンとそれを構成する最小単位の工具パスを示す。

加工中はこの工具経路パターンに従って、1つの加工面 (Z 平面) の加工を終了させる。そして、これを複数回繰り返すことにより、製品形状となるまで加工を行う。また、図3の実線矢印で示した切削工具パスにおいては、工具と製品形状との干渉が検出された場合には製品形状を倣うように (回避するように) 工具経路が生成される。

2.2 工具の回避方向

等高線加工においてボス部を加工する場合、図4で示すように加工の原理に従えば切削方向 (上向き切削または下向き切削) がボス部の形状や工具のアプローチ角度に左右されてしまう。ところが加工途中で工具パスごとに切削方向が変化すると、図5で示すようにある工具パスで加工体積が激増してしまう。従って、切削方向が加工中に変化しないようにする必要がある。一般に下向き切削は上向き切削に比べて切削温度が低く、工具磨耗が少ないなど広く知られている⁶。

Fig.3 Tool path pattern

Fig.4 Examples of up cutting and down cutting

Fig.5 Cutting volumes by tools avoidance

そこで本システムでは常に下向き切削となるように工具の回避方向を制御することとした。

図4に示したように、仮想加工制御では仮想スタイラスと仮想マスタモデルの干渉量に注目し、その最大干渉方向とは逆の方向に法線方向速度ベクトル V_N を決める。そして、接線方向速度ベクトル V_T と合成することにより、工具送り速度ベクトル V を算出している⁵⁾。 V_T の方向は、仮想スタイラスと仮想マスタモデルの干渉方向で決定されるが、この V_T の方向を制御してやれば切削方向（工具の回避方向）を制御することができる。

Fig.6 Avoidance behavior of up cutting

例えば、図4(b)の例で上向き切削を下向き切削とするためには V_T の方向を反転させればよい。これは V_T の方向を常に V_N の方向の時計回り 90 度に固定することで可能となる。図6で示すように、仮想スタイラスはa地点でボス部と干渉する場合、 V_T^a の方向を上記の通り制御することで工具送り速度ベクトル V^a が算出できる。これはb地点で干渉している場合にも有効であり、従来通り V^b を算出することができる。このように V_N と V_T の関係を規定することで、本システムにおける等高線加工で上向き切削を回避することが可能となる。

3. 干渉チェックの強化と等高線加工の実現

これまで、干渉チェックは図2で示した工具中心を通る動作平面において、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7(a)に示すようにZ軸を基準にした角度 θ ごとに計算していた。そしてこの中で干渉量が最大となる角度 θ を仮想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た。

また、仮想スタイラスが仮想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 ϵ_1 、 ϵ_2 の大きさ

と方向を考慮しながら、図7(b)で示すように合成することにより仮想スタイラスの変位量 ϵ と方向を決めていた。

しかし、工具中心を通る動作平面でのみ干渉チェックをしていたため、仮想マスタモデル形状が複雑になった場合に、オーバーカットを生じていた。

そこでこれまでの干渉チェック⁵⁾を基本にして、微小な間隔の複数平面で干渉チェックを行い、複数平面における干渉量から仮想スタイラスの変位量 ϵ を求めるように干渉チェックを強化した。図8に示すように、走査線加工、等高線加工それぞれの加工モードにより、干渉チェックを行う複数平面の向きは異なる。

(a) Touching at one point

(b) Touching at two points

Fig.7 Detection of result displacement

(a) Scanning-line machining mode

(b) Contour-line machining mode

Fig.8 Plane to detect displacement

それぞれの平面内での干渉量 ϵ_i は、これまでの干渉チェック法を用いて計算する。これは等高線加工に対しても同様で、XZ 平面あるいは、YZ 平面で行っていた干渉チェックを XY 平面で行えば可能となる。また、工具をスクエアエンドミルとする場合は、平面内での工具断面形状を変更するだけで対応できる。

最後に図 9 で示すように、複数平面それぞれで検出された干渉量 ϵ_i を表すベクトルの中で最も大きいものをこの仮想スタイラス位置での干渉量 ϵ と定める。

これまでの干渉チェックでは、マスタモデルの形状によってはオーバーカットを生じていた。このときの工具経路生成結果を図 10 に比較して示す。これまでの干渉チェックでは、仮想スタイラスの中心軸と移動軸を含む平面でのみ干渉チェックを行っていたために、工具の左角がマスタモデルをオーバーカットしている。しかし干渉チェックを強化することでこの問題点が解消されたことがわかる。

次に、複数の平面で干渉チェックをすることで可能となった等高線加工でその有効性を確認した。等高線加工での工具経路生成シミュレーションの結果を図 11(a) に示す。また、前報で走査線加工を対象として行った、送り速度とピックフィード、切込みの実時間修正をこのシミュレーションにおいても確認した。

図 11 (b) ではピックフィードの修正が行われた部分を示しているが、これは本システムの実行画面 (GUI) から操作している。実行画面を操作すると次の工具パスでピックフィードの変更が反映される。また、図 11 (c) では切込みの修正が行われた部分の工具経路を示している。これも同様に実行画面から操作することで、即座に切込みが半減される仕組みになっ

Fig.9 Displacement by detected in planes

ている。等高線加工を行っている際に切込みを変更すると、その加工面に段差が生じるが、本システムでは変更後の面の加工が終了すると工具を切込みを変更した地点まで戻し、段差を取り除いた後に新たな面の加工を開始する。

Fig.10 Comparison of tool paths

Fig.11 Tool path in contour-line machining

4. 仮想加工実験

以上で述べたように、新たに導入した干渉チェック手法の有効性が確認できたので、次に実際に NC 工作機械を制御しながら実験を行った。図 12 にその実験装置を示す。NC 工作機械は大阪機工の立型マシニングセンタ 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 Pentium III Xeon 550MHz, RAM が 256MB, OS が Windows NT で、制御装置とは HSSB と呼ばれる高速データバ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。実験に使用した計算機の場合、工具微小移動量を求めるための計算時間は平均で約 3msec であるが、計算時間の変動やデータ転送に要する時間を考慮して、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。

Fig.12 Experimental setup

図 13 に走査線加工(実験 A)および等高線加工(実験 B)それぞれの実験での加工結果を示す。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 10 mm の超硬、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。実験 A および実験 B それぞれの切削条件とその修正履歴を表 1 に示す。どちらの実験も荒加工には約 15 分、実験 A の仕上げ加工には約 17 分、実験 B の仕上げ加工には約 48 分を要したが、異常なく実験を終了させることが出来た。

本システムでは、効率の良い工具経路を生成しているわけではないが、実時間で工具経路を生成していることにより、現状の NC 加工では不可能な加工途中でのピックフィードおよび切込みの修正を可能としている。また、この機能を用いることで工作機械自らが加工状況をモニタリングし、それを工具経路や切削条件に反映するという工作機械の自律化が実現可能となる。

(a) Finished shape of experiment A

(b) Finished shape of experiment B

Fig.13 Example of virtual copy milling

Table1 Cutting conditions

(a) Experiment A

	Rough cut	Finish cut
Depth of cut (mm)	5.0→2.5	1.0
Step over (mm)	5.0→1.0→5.0	1.0
Rapid feed (mm/min)	2000	2000
Jog feed : V_c (mm/min)	600→1300→200→600	600
V_N gain : G_N	20	20
V_T gain : G_T	1	1
Reference displacement : ϵ_n	0.5	0.5
Interval time : t (msec)	16	16

(b) Experiment B

	Rough cut	Finish cut
Depth of cut (mm)	3.0→1.5→2.5	1.0
Step over (mm)	4.0→1.0→4.0	1.0
Rapid feed (mm/min)	2000	2000
Jog feed : V_c (mm/min)	600→1300→200→600	600
V_N gain : G_N	20	20
V_T gain : G_T	1	1
Reference displacement : ϵ_n	0.5	0.5
Interval time : t (msec)	16	16

5. 結 言

本論文では、実時間工具経路生成のために開発した仮想加工システムの信頼性、柔軟性を向上させるため、仮想スタイラスと仮想マスタモデルの干渉チェックを強化し、等高線加工を実現した。結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 仮想加工システムを構築し、実時間で工具経路を生成しながら機械加工が実現できることを確認した。
- (2) 走査線加工において干渉チェックを強化し、シミュレーションによってこれまでの問題点が解決される事を確認した。
- (3) 仮想加工システムに等高線加工という新たな加工モードを追加し、切削実験によってそれを検証した。

今回、等高線加工という新たな加工モードを追加したことで、本システムの柔軟性は向上した。今後は、この実時間で工具経路が生成できる機能を加工状況判断技術および加工条件修正技術と統合させることで、加工状況に柔軟に対応できる自律型 NC 工作機械を開発することが課題となる。

謝 辞

本研究は平成 11, 12 年度 科学研究補助金 (基盤研究(C) No.11650129) 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) 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
- 2) 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
- 3) 鈴木 裕, 是沢宏之, 原楨真也, 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(C), 60-577, (1994), 2900-2905
- 4) 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
- 5) 白瀬敬一, 近藤貴茂, 岡本 満, 若松栄史, 荒井栄司; NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想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), 日本機械学会論文集(C), 66-644, (2000), 1368-1373
- 6) 例えば, 藤村義雄著, 実用切削加工法第2版, 共立出版, (1991)