5 軸制御マシニングセンタによる切削・研削加工*

——凸型自由曲面について——

出 村 健** 竹 内 芳 美***

Machining and Grinding by 5-Axis Control Machining Center
—For the Workpiece with Convex Sculptured Surface—

Takeshi IDEMURA and Yoshimi TAKEUCHI

This study deals with 5-axis control machining and grinding of workpieces with sculptured surface. The 5-axis control machining and grinding allows sculptured surface to be produced efficiently and accurately. The system developed in the study generates the collision-free tool path for machining and grinding workpieces with sculptured surface, based on the CAD/CAM system P-CAPS employing the solid modeling technique. For grinding, the high speed spindle attachment is used to increase the rotational speed of grinding tool, which consists of rubber pad and diamond abrasive cloth. The system realizes the surface roughness of $0.23 \mu\text{m}$ for the workpiece with sculptured surface. As a result, the system has potential of producing workpieces with high accuracy and efficiency.

Key words: 5-axis control, machining, grinding, CAD/CAM, solid model, collision-free tool path, sculptured surface

1. 緒 言

現在主流となっている CAD/CAM システムの大半は 3 軸制御加工のシステムであり、製品形状の多様化が進む今日、多軸の工作機械に対応できるシステムが必要とされている。多軸制御の NC 工作機械を用いることにより、3 軸制御では加工が困難である部品形状を高精度に能率よく加工することができ、生産性の向上をもたらす¹⁾²⁾。そこで、前報ではソリッドモデルで定義した形状をもとに、工具と工作物の間に起こる工具干渉を自動的に回避する 5 軸制御ソフトウェアの開発について報告した³⁾。

3 次元形状は一般にマシニングセンタなどを用いて創成される。続く研削、研磨加工は NC 研削盤を用いて行われるが、自由曲面を含む形状については自動処理が困難である⁴⁾。CAD/CAM システムで生成する 5 軸制御の工具経路を、切削加工だけでなく研削・研磨加工にも利用できれば、加工工程の自動化を進めるうえで大きな効果をもたらす。

そこで、マシニングセンタの ATC 機能を使って、

研削工具を主軸に装着し、研削加工を行うことにする。切削と研削を 1 台の機械で行うことにより、段取り時間の削減と加工精度の向上が期待できる。

本研究は、ソリッドモデルで定義した形状を 5 軸制御で切削加工し、続いて研削工具によって同じマシニングセンタ上で研削加工を行うための基礎を確立しようとするものである。

2. システム構成

CAD による形状定義から NC データ生成までではなく EWS (住友電工製 SUMISTATION) を用いてオフラインで処理している。生成された NC データは光ファイバケーブルを介して DNC で伝送される。使用した 5 軸制御 NC 工作機械は、ヤマザキマザック製のティルティングテーブル型 5 軸マシニングセンタで、X, Y, Z の 3 軸に加えて工作物を取り付けるテーブルが旋回および傾斜する構造を持つ。

切削加工後、同じ 5 軸マシニングセンタ上で研削加工を行うには、砥石に高速の周速度を与える必要がある。しかし、主軸の回転数に制限があるので、マシニングセンタに増速スピンドル (日研工作所製超高速型スピンドルスピーダ BT 40-PX 6) を装着する。増速スピンドルはマシニングセンタのスピンドルにそのまま装着でき、内部の遊星歯車機構により主軸回転数の

* 原稿受付 平成 3 年 2 月 25 日。1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (平成 2 年 9 月 28 日) にて発表

** 学生会員 電気通信大学 (調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*** 正 会 員 電気通信大学

Fig. 1 Tool attitude in case of flat tool

6倍, 最高 30 000 rpm まで増速することができる。

工具はゴムパッドにダイクロス (マコト・アブレーシブ) を張り付けたものを使用した。ゴムパッドは弾性体であるため, 加工物に対して面あたりが良い。工具底面が平らであるため, 加工形状は制限されるが, 面接触により高能率に加工できる。

3. 5軸制御切削・研削加工ソフトウェア

3.1 工具の経路の考え方

P-CAPS/CAD⁹⁾により定義した3次元形状のCSGデータからまず加工点を決定する。CSGデータとして表現できる形状はプリミティブ, 回転体, 円環体, 自由曲面, およびそれを集合演算したものであるが, この5軸制御加工では自由曲面を対象としている。

加工曲面に対する工具姿勢は, 工具中心点を始点とする工具軸ベクトル T を計算することにより決定される。5軸制御の場合, 工具は任意の姿勢を取ることが可能であるが, フラット工具の場合, 工具姿勢は工具の送り方向に傾斜させるのが望ましい。

前報で説明したように, ボールエンドミルのような工具の先端が半球状の工具を用いる場合, NCデータは工具中心で定義するため, 工具オフセットする必要がある。その際, 曲面の法線方向に工具半径分シフトするだけでよく, 工具姿勢が変化しても工具オフセットの座標値は変化しない。しかし, フラット工具を用いて図1に示す方法で加工する場合は, 工具姿勢により工具中心点の座標が変化する。従って, フラット工具を用いるときは, まず工具姿勢を決定し, それから工具中心点の座標を計算する。

3.2 フラット工具の経路生成

前節で述べたように工具軸ベクトルが曲面の法線ベ

Fig. 2 Calculation of tool center point

クトルに対して常に θ 度だけ傾けることができれば, 凸曲面だけでなく, 凹曲面に対しても加工可能となる。工具干渉のない限りこの姿勢を保ちながら加工を行う。図1に示すような工具姿勢は切削および研削の両方に適用されるが, 工具干渉が生じると工具を干渉回避させなければならない。

干渉回避する場合, 工具は送り方向に傾斜できるとは限らないので, 工具が図2のような姿勢をとるとき工具中心点を求める。工具の切削点をP, 曲面の法線ベクトルを N , 送り方向のベクトルを F として, ベクトル N と F の外積からベクトル C を求める。この3つのベクトルはPを交点にして直交しており, どれも正規化されているものとする。

N と T のなす角を θ_1 とする。また, Pを始点とする2つのベクトル F と C がなす面に T を投影したベクトルを T' とし, T' と F のなす角を θ_2 とすると, 切削点Pから工具中心点Oへのベクトル S は次のようになる。

$$S = E^{N\theta_1} \cdot E^{C\theta_2} \cdot \text{REV}(F) \quad (1)$$

ここで $E^{N\theta_1}$, $E^{C\theta_2}$ はそれぞれベクトル N , C のまわりに θ_1 , θ_2 度回転する 4×4 の変換マトリクスを表し, $\text{REV}(F)$ はベクトル F の各成分の符号を反転させたベクトルを意味する³⁾。

工具中心点Oの座標は次のようになる。

$$O = P + r \cdot S \quad (2)$$

ここで, r は工具半径である。式(2)を用いて, フラット工具を用いたときの工具中心点を求めることができる。計算された工具中心点の座標と工具軸ベクトルはCLデータとして保存される。

3.3 フラット工具の干渉回避

Fig. 3 Example of tool definition

5軸制御マシニングセンタを使用する際、工具に様々な姿勢を与えるため、工具とそれを取り巻く環境との干渉が大きな問題となる。そこで、工具と加工対象物の干渉チェックを行い、干渉が回避される工具姿勢を計算する。CSGで定義された加工対象物と、工具形状の相対的な位置関係から工具の干渉チェックが実現される。

最初に使用工具の寸法が記述されているファイルを読み込み、工具座標系に工具を定義する。工具はZ軸を回転中心とする回転体とし、形状全体を幾つかのブロックに区分けする。各ブロックにおける上端直径、下端直径およびZ軸方向のブロック長を設定し、これらのブロックを組み合わせることにより多種の工具が定義できるようにしている。このとき、工具の中心点は工具座標系の原点に一致させる。図3は研削加工で用いる増速スピンドルの定義例を示したものである。

工具の周囲に設けられたチェックポイントは、図に示すように工具の円周方向に等間隔に P_1 から P_n まで設置され、それぞれをZ軸方向に延長した点列からなる。このように、工具形状をチェックポイント群の集合体として近似する。工具の各チェックポイントの座標と、CSGデータの内外判別を行うことにより干渉チェックが可能となる。

フラット工具を使用した時の干渉回避の手順は前報で述べたボールエンドミルの場合と同様であるが、工具の回避方向はできる限り工具の送り方向とする。また、工具が傾きすぎると加工表面に悪影響を与える可能性があるため、加工表面の法線ベクトルと工具軸ベクトルのなす角度には制限を与えている。

4. 平面の研削加工

マシニングセンタで自由曲面等の意匠形状を、切削だけでなく研削まですることができれば効果的である。そこで、マシニングセンタの研削性能を明らかにするため、まず平面形状の研削実験を試みた。

Fig. 4 Relationship between grain size and surface roughness

工具はダイヤクロスを直径20 mm、高さ17 mmの山型のゴムパッドに張り付けたものを用いている。ゴムパッドの上部には直径3 mmの軸があり、それを増速スピンドルに固定し、研削に必要な砥石周速度を得ている。研削は強制切込み方式で行うが、弾性工具を採用しているため、形状精度を保ちながら面あたりの良い加工が期待できる。また、砥石形状は底面がフラットのものを用いるので、面接触による効率の良い加工となる。

ダイヤクロスは粒度が#150、#320、#600、#1500の4種類を用意した。まず、3種類の砥石回転数を変化させ、砥石粒度による面粗さの限界を調べた。被削材はフライス加工したS55Cで、送り速度は100 mm/minである。砥石回転数と各粒度における表面粗さの関係を図4に示す。グラフから粒度を高くするにつれて面粗さは改善されるが、砥石回転数は面粗さにはほとんど影響を与えないことがわかる。

次に、砥石回転数が加工能率に与える影響を調べた。3種類の砥石回転数で#150のダイヤクロスを用い、切込み量を200 μmとし、平面を往復加工して、所定の研削回数後、工具の送り方向に直角に変位をトレースして除去深さを計測した。このときの砥石回転数と除去深さの関係を図5に示す。図より16000 rpmのとき、加工能率が良いことが分かる。回転数が高いほど加工能率は良いと思われるが、使用しているゴムパッドが弾性体のために高回転数では形状が変形し、接触状態が変わると考えられ、そのため加工能率が最良となる回転数が存在することが予想される。また、ダイヤクロスが良好な切れ味を保つのは約1時間で、それ以上の連続加工には交換が必要となる。

砥石回転数が16000 rpmのときの研削回数と表面粗さの関係を図6に示す。ただし、研削回数は工具1

Fig. 5 Relationship between grinding wheel rotation and depth of stock removal

Fig. 6 Relationship between repetition number of grinding and surface roughness

Fig. 7 Surface roughness after grinding

往復を1回としている。適切な粒度を選び、研削回数を増すと面粗さが改善され、一定値に収束していく。このデータを基に粒度の違うダイヤクロスの交換や研削回数の調整ができる。

フライス切削後、粒度を変えながら最後に#1500のダイヤクロスで仕上加工した後の表面粗さデータを図7に示す。フライスによる切削加工面の表面粗さは

Fig. 8 Defined workpiece shape with sculptured surface

$R_{\max}$ 7.8 μm であり、これをダイヤクロスで仕上げることにより $R_{\max}$ 0.19 μm まで改善できた。

5. 5軸制御による凸形状曲面の 切削・研削加工実験

開発したソフトウェアをもとに、5軸制御マシンングセンタによる凸型形状自由曲面の切削・研削加工実験を行った。定義した形状の陰影表示を図8に示す。大きさは100 mm×100 mm×50 mmである。

切削加工における荒加工は3軸制御で行う。CSGデータからZ-map⁵⁾を生成し、フラットエンドミルを用いた等高線モードで加工する。仕上加工は工具径20 mmのフラットエンドミルを用いて同時5軸制御で行う。そのとき、主軸回転数は300 rpm、送り速度は100 mm/min、ピックフィード量は2 mmに設定した。この条件の基に干渉チェックした仕上加工データをCSGデータから直接生成するのにEWSで約11分かかっている。ボールエンドミルよりもピックフィード量を大きく取ることができるので、仕上切削時間の短縮が可能になっている。また、工具は曲面の法線方向から送り方向に3°傾けて加工する。なお、被削材はS55Cである。5軸による仕上切削加工時間は127 minである。

仕上切削後は、切削工具を研削ユニットと交換し、同じマシンングセンタ上で研削加工を行った。研削工具は、図9に示すようなゴムパッドにダイヤクロスを張り付けたものを用い、これを増速スピンドルに取り付けている。砥石回転数は平面研削データに基づいて16000 rpmに設定した。ダイヤクロスは#150、#320、#600、#1500の粒度を用意したので研削加工だけでなく、仕上加工まで対応できる。走査線方向に

Fig. 9 Configuration of grinding tool

Fig. 10 Tool path simulation

Fig. 11 Under way of grinding

100 mm/min で送るが、加工開始点と加工方向、ピクフィード量を1~5 mmの間で毎回変え、加工量の偏りがないようにする。工具干渉のない限り、工具は加工曲面の法線方向から送り方向に1°傾けた姿勢を維持するように指定した。

Fig. 12 Machined and ground workpiece

(a) Surface roughness before grinding

(b) Surface roughness after grinding

Fig. 13 Comparison of surface roughness before and after grinding

研削経路パス例を図10に示す。また、ダイヤクロスは約1時間ごとに交換し、前段階の加工跡が完全に消失してから次の砥石粒度に移行するようにしている。加工時間は、砥石粒度#150、#320、#600、#1500のときにそれぞれ220 min、32 min、29 min、96 minであった。加工状況を図11に示す。

切削と研削後の形状を図12に示す。右側が切削面、左側が研削面であり、良好な仕上がり面であることが分かる。仕上切削面の表面粗さは、図13に示すように R_{max} で $15\mu m$ であり、ダイヤクロスによる研削仕上加工では R_{max} $0.23\mu m$ である。

切削加工で用いる工具は剛体であるため、理想的に

Fig. 14 Variation in workpiece shape by grinding

は指令値がそのまま工作物に転写されるが、研削加工で用いる工具は弾性体であるために正確な形状精度は保証されない。そこで、切削後の形状を理想形状と仮定し、切削後と研削後の形状を3次元測定機を用いて計測し、研削による形状変化を評価した。図14にその結果を示すが、横軸は形状の計測位置を、縦軸は切削面を基準面として研削面との高さ方向の変位差を表したものである。図より形状の端部で研削量が多いことが分かる。これは加工開始点では工具の一部が接触するために加工物にかかる接触圧力が局部的に高くなることに起因すると考えられる。形状端部以外では40~50 μmで一定した傾向が見られる。絶対値で形状精度が必要な場合は、研削代を見込んで仕上切削をしなければならない。

6. 結 論

ソリッドモデル P-CAPS で定義した CAD データから5軸制御による切削および研削加工を試み、以下

のような結論を得た。

- (1) CSG データを利用して、フラット工具を用いた場合の工具干渉回避の手法を示し、自由曲面の5軸制御切削・研削加工に適用することができた。
- (2) マシニングセンタの主軸に増速スピンドルを装着し、ゴムパッドとダイクロスをを用いて平面を研削加工したところ、 $R_{\max}$ で 0.19 μm の表面粗さを得ることができた。
- (3) ソリッドモデルで定義した凸形状の自由曲面を同時5軸で切削加工したのち、増速スピンドルを取り付けたマシニングセンタで研削加工を試み、 $R_{\max}$ 0.23 μm の良好な加工表面を得ることができた。

本研究の遂行にあたり、協力していただいた本学学生の渡辺隆弘氏と久木達也氏、ならびにヤマザキマザック(株)に深く感謝する。なお、研究の一部は文部省科学研究費(C 02650088)、および(財)高度生産システム振興財団助成金の援助で行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 西村真禎, 本田尚義: 複合機能対応型マシニングセンタ, 型技術, 6, 2 (1991) 31.
- 2) 圧縮羽根車の加工時間短縮: 日経メカニカル, 7月11日号 (1988) 48.
- 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) 幸田盛堂: 最近の金型仕上げ加工技術, 機械の研究, 40, 10 (1988) 1076.
- 5) Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe and R. Orita: Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, Ann. CIRP, 38, 1 (1989) 429.