複合加工機による鎖形状の巧妙加工*

河 口 泰 大^{*1}, 中 本 圭 一^{*2}
石 田 徹^{*2}, 竹 内 芳 美^{*3}Dexterous Machining of Chain-Shapes by Means
of a Multi-Tasking Machine ToolYasuhiro KAWAGUCHI, Keiichi NAKAMOTO,
Tohru ISHIDA and Yoshimi TAKEUCHI^{*4}^{*4} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In recent years, complicated shapes have been required to be machined at a shorter time. Machine tools have become highly accurate and had multifunction as well as the development of CAD/CAM systems. However, there exist a lot of things difficult or impossible to create even by multi-axis control CNC machine tools. Most of them are made by skilled persons of ingenuity and device. In the future, it is predicted that consumer needs are getting more various and that consumers require individual goods matching for their feeling. The study presents the first trial of creating an artistic workpiece by use of a multi-tasking machine tool. Such a machining technology may be called "Dexterous Machining". As an example, a chain-shaped workpieces are selected, which cannot usually be machined in the conventional manner. Thus, a special type CAM system is developed, taking account of the interference between a cutting tool and a workpiece, and by use of the second main spindle. As a result, it is found that the developed CAM system has the potential of realizing Dexterous Machining.

Key Words: Multi-Tasking Machine Tools, Turning, Milling, CAM, Process Planning, 5-Axis Control

1. 序 論

昨今, 多種多様な製品を市場ニーズに合わせて生産したいという要請から, マシニングセンタや複合加工機などの多機能工作機械と CAD/CAM システムが活用され, 設計・試作の合理化や多品種中少量, ときには個別生産が果敢に行われている。

このような工業製品の生産の一方で, 複雑な形状をもつ品物を巧みに加工し, 高機能を付加した品や芸術品と呼んでもいいような特殊な品も存在する。工業製品ではあるけれども高度な熟練技能が盛り込まれた品を創出する加工技術をここでは「巧妙加工」と呼ぶことにする。高い付加価値をもつ製品の創造にはこの巧妙加工が不可欠になると予想される。

そこで本研究では, 旋削機能とミリング機能をもち, 同時5軸制御フライス加工が可能だけでなく, 刃物台・第1主軸に加えて第2主軸を備え, 加工物の受け渡しや切離し, さらに両主軸がそれぞれ加工物を把

持したまま加工のできる複合加工機を利用し⁽¹⁾, この巧妙加工を扱う。図1には複合加工機の構成例を示す。

高い熟練技能によってできあがった超複雑形状は, その把持や固定の方法さえ想像がつかず, 工具の工夫や加工条件の設定にも分からないことが多い。本研究は, 巧妙加工を, 技能から技術, 暗黙知から形式知, 経験からエンジニアリングへのプロセスと位置付け, その一端を解明しようとするものである。

Fig. 1 Multi-tasking machine tool

* 原稿受付 2010年3月29日。

^{*1} 学生員, 大阪大学大学院工学研究科(〒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。^{*3} 正員, フェロー, 大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: takeuchi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

その手始めとして、ここでは図2に示すような鎖/リング形状(Type I)とその拡張形状(Type II)の加工を試みる。

2. 加工対象形状と把持用ジグ

本研究で加工する形状は、図2(a)のような鎖状の形状を対象とし、それより派生させた図2(b)に示す Type I と図2(b)に示す Type II の形状を加工する。これらの形状は、物理的には2つの物体であるが、相互に組み合わさっていて、完全に分離させることはできない。従来このような形状の加工は、ある程度まで加工を行ったのち、ジグを取り付け、分離加工を行い、仕上げている。通常はジグを用いた段取り替えが必要であり、一度で加工できない。Type I の形状は2物体を第1主軸と第2主軸でそれぞれ把持できるような形状である。しかし、Type II の形状は空中に浮かぶ物体を有する形状であり、そのままでは両物体を把持

Fig. 2 Two types of shape

Fig. 3 Jig set to the second spindle

することができない。そこで、物体 B を把持するためにジグが必要となる。

本研究で開発したジグを図3に、実際に製作したジグで物体を把持している様子を図4に示す。途中の段取り替えを不要にするため、第2主軸の爪に取り付けられるジグを開発し、加工途中で第2主軸を移動させることによって物体 B の把持を行うことができるようにしている。

また、把持できる形状の大きさを変えられるように、ジグ先端部の位置は変えられる。しかし、第2主軸の爪に取り付け自動で把持する以上、ジグが把持する物体 B の形状は、回転対称体、またはそれに類似する形状に限られる。

3. 荒加工用 CAM システム

以下に荒加工工具経路生成方法の手順を示し、詳細を後述する。

- (1) CAD データを入力してボクセルに分割する。
- (2) X 座標または Y 座標が一定のボクセルから断面を得る。
- (3) 断面上に工具経路を生成する。
- (4) 削り残った箇所工具姿勢を変更して経路を生成する。
- (5) ブリッジ部を切断し、2 物体に分離する。

まず、物体 A と物体 B の2物体を分離する直前まで残す橋渡しの部分(以下、ブリッジと呼ぶ)を設定する。このブリッジは、図5に示すように2物体を平面に投影し、物体 A と物体 B が重なって投影される部位に貫通するように設定したものである。ここでは、投影する平面として XZ 平面を用いた。

次に、物体 A、物体 B および設定したブリッジの CAD データから、それぞれの物体を単位立方体(以下、ボクセルと呼ぶ)に分割してデータを計算し出力する。荒加工はこのボクセルを基にして計算を行う。荒加工の最初の段階である各断面のミリング経路の様子を図

Fig. 4 Jig holding the second body

6に示す。X座標またはY座標が一定のボクセルの集合が+X, -X, +Y, -Y方向に対して垂直な断面である。この各断面について、工具姿勢を垂直に設定し、干渉せずに切削できる範囲を切削する。

以上の工程において、X軸、Y軸に平行な方向から切削を行うため、切削できない部位が残る。そこで、この残部を切削する工具経路を求める。各々の残ったボクセル中心点に対して、Z軸まわりに22.5°程度ずつ回転させた工具軸ベクトルを生成し、それぞれの工具姿勢について干渉判定を行う。なお、ここでは1回転を16分割した値である22.5°を用いた。その工具軸ベクトルの全てが干渉するようであれば、Z軸を含む平面内で22.5°傾斜させた工具軸ベクトルを生成し、再度干渉判定を行う。このようにして干渉を回避すると判断された工具軸ベクトルの中から、なるべく連続した姿勢になるような工具軸ベクトルを選び、工具経路とする。

最後にブリッジ部を切断し、2物体に分離する。ここまでの工程で物体A、物体Bおよびブリッジを合わせた形状の荒加工ができたので、Type Iについて

Fig. 5 Generation of the bridge

Fig. 6 Milling of each cross section

は第1主軸および第2主軸で、Type IIについては第1主軸および第2主軸に取り付けたジグで両物体を把持したのち、物体Aおよび物体Bを接続していたブリッジを切断し、2物体に分離する工具経路を生成する。このときの工具経路生成方法は、残部を切削するときのものと同様である。なお、Type Iの形状では初めからあらかじめ物体Bを第2主軸で把持しておくことも可能である。

4. 仕上げ加工用 CAM システム

物体A、物体B、およびジグの3体の情報を有するCADデータから、物体Bおよびジグが回転した状態のCADデータを作成する。このCADデータは、干渉判定および干渉回避に用いる。物体Aに対して、ジグと一体とみなした物体Bの2物体の形状をZ軸まわりに回転させて干渉判定を行い、2物体が干渉無く回転できる範囲を求める。その範囲内で回転させた状態のデータを書き出し、干渉の有無の判断に使用する。

次に、図7のフローチャートで示すように、物体の表面のデータから各加工点、およびその加工点における工具軸ベクトルを生成し、先ほど生成した回転した物体のデータより干渉判定を行い、干渉を回避する工具経路を導き出す。

仕上げ加工にはボールエンドミルを使うことを前提とする。ボールエンドミルの工具中心点は、加工面を工具半径分だけオフセットしたオフセット面上に存在するので、まず目標形状のオフセット面を計算する。オフセット面は2つのパラメータ u , v で張られる曲

Fig. 7 Flow chart of finishing

Fig. 8 Interference positions

面となるが、その曲面に対して指定した数で分割した各(u , v)の組で表される格子点を工具中心点とする。同時に格子点での法線ベクトルを算出し、これを工具軸ベクトルと加工面との角度の計算に利用する。

山田らの研究⁽²⁾によれば、工具軸ベクトルが加工曲面より 10° 以上 40° 以下の範囲で傾斜しているとおおむね安定した表面性状を得られることがわかっている。そこで、ある工具軸ベクトルを設定したのち、法線ベクトルとのなす角度が 10° 以上 40° 以下の範囲になれば、適切な範囲内におさまるように修正する。また、図 8(a), (b) に示すように、工具軸ベクトルが物体 A, B およびジグと干渉するようであれば、物体 B の姿勢の変更および工具軸ベクトルの修正を行い、図 8(c) のような干渉が起こらない物体 B の姿勢、および工具軸ベクトルを設定する。なお、図 8(a) と (c) で物体 B の位置は (b) に対して対称であるが、工具の進行方向から干渉の有無が異なっている。

5. 加工順序およびポストプロセッサ

各加工段階で算出された CL データが適切な加工順序になるように各加工段階を並び替える。ジグを用いない Type I の場合⁽³⁾ とジグを用いた Type II の場合では順序が異なる。

まず、ジグを用いない Type I の加工順序について説明する。ジグを用いない場合は、単純に荒加工、切り離し、仕上げ加工の順序で加工する。物体 A, B がブリッジで繋がった形状に関して荒加工を行い、次に、物体 B の部分を第 2 主軸で把持する。物体 A, B の両者を把持できたらブリッジ部を切削し、2 物体に切り離したのち、前述の手法によってそれぞれ仕上げ加工を行う。荒加工の段階で第 2 主軸により物体 B を把持していても影響がない場合は、あらかじめ両主軸で両端を把持しておく。

次に、ジグを用いる Type II は以下のように加工順序する。

- (1) 物体 A, 物体 B およびブリッジを含む形状の荒加工を行う。
- (2) ジグを用いて物体 B を把持すると、第 2 主軸側の加工を行う際に干渉の危険性が増大するため、先に第 2 主軸側の仕上げ加工を行う。
- (3) ジグを用いて物体 B を把持する。
- (4) ブリッジ部を切削し、物体 A と物体 B を分離する。
- (5) 残った部位の仕上げ加工を行う。

ここで、ジグを用いて物体 B を把持する前に、第 2 主軸側の仕上げ加工を行うのは、干渉の危険性を低下させるためである。

上記の手法により求めた干渉が生じない工具中心点、工具軸ベクトル、物体 B およびジグの回転角度の値を基に、ポストプロセッサによって NC コードを算出する。複合加工機の軸構成は図 1 のとおりである。工具軸ベクトルは B 軸によって XZ 平面上のみを傾斜する。そこで、工具軸ベクトルが XZ 平面上にあるように工具軸ベクトルの値から主軸回転量である $C1$ 軸の回転角度を定め、それによって回転した工具中心点の X 座標、 Y 座標、 Z 座標を求める。

次に、 XZ 平面上にある工具軸ベクトルから B 軸の値を算出する。また、第 2 主軸の回転量である $C2$ 軸の値は、元の物体 B の物体 A に対する回転角度の値に $C1$ 軸の値を加えたものとなる。

6. NC コードの検証

Type I と Type II の加工 NC コードを NC シミュレータ (G-Navi, アイコクアルファ) にかけて加工のシミュレーションを行った。Type I については $R2.5\text{ mm}$ ボールエンドミルを、Type II については

(a) Rough cutting

(b) Finishing

(c) Finished shape

Fig.9 Simulation of Type I

R 1.5 mm ボールエンドミルを使用する。被削材の大きさは $100 \times 100 \times 400$ mm である。

図9は Type I の鎖状形状に対する加工シミュレーションである。図9(a)は荒加工中の図で各断面ごとにミリングによって加工している。同図(b)は分離後に仕上げ加工を行っている様子で、物体 B を回転させて工具の干渉を回避していることがわかる。同図(c)は物体 A の側の仕上げ加工が完了した様子である。

次に、Type II の形状に対する荒加工シミュレーションを行った結果を図10に示す。図10(a)は荒加工後の様子、同図(b)は分離後に左側部分の仕上げ加工を行っている様子である。

(a) Rough cutting simulation

(b) Finishing simulation

Fig.10 Simulation of Type II

7. 加工実験

Type I, Type II のそれぞれの形状について生成された NC コードが適切であることが示されたので、加工実験を行った。実験の条件は表1のとおりである。なお、本実験では荒加工から仕上げ加工まで1本の工具で加工を完了し、仕上げ代は設定していない。

図11に Type I の形状に関する加工実験の様子を示す。図11(a)は荒加工後ブリッジを切削して分離加工を行っている様子を、同図(b)は仕上げ加工後の様子を示している。

図12には Type II の形状に関する加工実験の様子を示す。図12(a)はある断面に対して荒加工を行っている様子、同図(b)はジグで物体 B を把持している様子、同図(c)は加工完了後の様子である。

このように、複合加工機の第1主軸と第2主軸で被削材の両端を把持したまま切り離すことができる機能を使って、Type I の鎖状につながった形状および Type II の空中に浮かぶ形状をもつ形状を、一つの被削材から段取り替えすることなく加工することができた。また、Type I については物体 A, B および工具の3者の干渉を、Type II については開発したジグも含めた干渉を回避しながら把持、切離しおよび仕上げ加工をうまく行えた。

Table 1 Experimental conditions

Multi-tasking machine tool Mori Seiki NT4250 DCG/1000sz		
Max. turning diameter	660 [mm]	
Max. turning length	1,027 [mm]	
Travel (Tool spindle)	X: 750, Y: ± 210 , Z: 1,120 [mm]	
B-axis rotation	± 120 [°]	
Travel (Turret 2)	X: 195, Z: 1,010 [mm]	
Product shape	Type I	Type II
Cutting tool	Ball endmill R2.5 [mm] Overhung: 75 [mm]	Ball endmill R3 [mm] Overhung: 60 [mm]
Workpiece	Chemical wood 50×50×200 [mm]	Chemical wood 100×100×300 [mm]

(a) Rough cutting experiment

(b) Finishing experiment

Fig. 11 Experimental result of Type I

しかしながら、Type II の形状に関して、常に物体の影となっていて切削することができない部位が残存しており、この処理を考える必要がある。

8. 結 論

「巧妙加工」を目指し、その第一歩として、複合加工機の第1主軸と第2主軸を工夫して用いて、従来まで段取り替えなしには加工できなかった形状を取り上げた。本研究では、物理的には2つの物体であるが、相互に組み合わせられていて完全に分離させることができない形状を扱い、CAMシステムの開発を行った。そ

(a) Rough cutting experiment

(b) Jig holding body B

(c) Finishing experiment

Fig. 12 Experimental result of Type II

の結果、鎖状の形状を段取り替えなしで加工することが可能となった。これにより、複合加工機を活用した巧妙加工の可能性が示された。

本研究を実施するにあたり、複合加工機を提供された MTTRF(工作機械技術研究財団)、工具を提供された(株)OSG、および NC 機械加工シミュレーションソフト G-Navi を提供された(株)アイコクアルファに感謝する。

文 献

- (1) Muraki, T., The Cost Comparison of "INTEGREX Series" and Conventional Facilities, *Tool Engineer*, Vol. 47, No. 11 (2003), pp. 27-32 (in Japanese).
- (2) Yamada, M., Kondo, T., Tanaka, F. and Kishinami, T., Sculpture Surface Machining by Automatically Indexing Tilted Tool Axis on 5-axis Machine Tools (3rd

Report): Evaluation of tool attitude by analysis of cutting force on tilted tool axis ball end milling, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 563-567 (in Japanese).

(3) Kawaguchi, Y., Nakamoto, K., Ishida, T. and Takeu-

chi, Y., Artistic Machining by Means of Multi-tasking Machine, *Proceedings of 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, (2009-12), pp. 145-148.