複数の曲がり円柱からなる複雑形状の巧妙加工*

夏目矩行^{*1}, 中本圭一^{*2}, 石田 徹^{*3}, 竹内芳美^{*4}

Dexterous Machining of Complicated Shape Consisting of Several Bended Columns

Noriyuki NATSUME^{*1}, Keiichi NAKAMOTO, Tohru ISHIDA and Yoshimi TAKEUCHI

^{*1} Department of Mechanical Engineering Osaka University,
Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

In recent years, manufacturing industries are facing severe competition to achieve products with high quality and low price. It is important to establish a new approach of creating value-added products like objects of craftwork or applied arts, different from traditional way of achieving products with high quality and low price. Manufacturing such value-added products generally needs skill and experience of experts. Thus, the objective of the study is to develop a CAM system for a multi-tasking machine in order to create value-added products, while converting implicit knowledge of experts into a formal knowledge. This kind of manufacturing way is named "Dexterous machining". The study deals with the CAM system to create a complicated shape consisting of bended columns as "Dexterous machining". The CAM system developed in the study can generate the tool path for rough cutting and finishing cutting in consideration of interference avoidance. The effectiveness of the CAM system is confirmed by demonstrating two kinds of bended columns by use of a multi-tasking machine.

Key Words : Dexterous Machining, Multi-Tasking Machine, Process Planning, CAM, Bended Column

1. 緒 言

近年, アジア諸国や新興国の工業技術が加速度的に進歩するにつれ, ものづくり分野は激しい低価格競争に晒されている. こういった状況においては, 低価格競争とは別の切り口でアプローチすることも重要であるといえる.

現在のものづくりは, 機能実現のため, 機能を司る形状を単純な要素に分割し, 各部品同士の互換性を基に製造し, そ

Fig. 1 Example of complicated shape consisting of bended columns

* 原稿受付 2011 年 11 月 7 日

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

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, 徳島大学ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

^{*4} 正員, フェロー, 中部大学工学部 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

E-mail: takeuchi_yoshimi@isc.chubu.ac.jp

れらを組み合わせることで製品が完成される。しかし、この互換性を配慮せず、複雑な形状をそのまま処理することで、高機能であったり、芸術品のような高い付加価値をもつ製品を製造することも一つの解であろう。このような加工技術のことを巧妙加工と呼ぶことにする。通常、この巧妙加工には熟練した技能が必要となる。熟練した技能者はその技を公開することなく、継承を難しいものとしている。

すでに鎖形状の巧妙加工⁽¹⁾と入れ子をもつ形状の巧妙加工⁽²⁾について報告したが、本研究でも同様に、このような技能者の脳裏にある暗黙知を形式知としてアルゴリズム表現することで、エキスパートの技能を複合加工機用CAMシステムとしてエンジニアリング化することを目的とする。本研究では、複数の曲がった円柱から構成される複雑形状に対して工具経路を生成するCAMシステムの開発を行った。特定の用途は考えていないが、円柱の曲がり状態、円柱の軸に沿った半径を変えるなどのバリエーションにも対応できる。図1には本CAMシステムが対象とする形状の一例を示す。なお、使用する加工機はX, Y, Z軸の並進3軸に加え、B, C軸の回転2軸を有し、ミリングとターニング機能をもつ複合加工機タイプである。

2. 曲がり円柱形状の荒加工

対象形状では荒加工すべき除去体積が大きくなる。そのため、ターニング作業を可能な限り行うことで加工時間の短縮を図る。対象形状に対してターニングが可能な範囲を算出するために次の処理を行う。

まず図2のように、上下の円盤状の部分を中心にそれをもち上げたロフトサーフェスを生成する。このロフトサーフェスにより包含される形状が加工前の形状となる。さらに、曲がり円柱表面を工具半径分オフセットした面を生成する。その後、ロフトサーフェスを、図3のように被削材の中心方向に向ってターニングの切込み量ずつ縮小していく。ロフトサーフェスが、曲がり円柱のオフセット面のうちどれか1つと交点をもつまでターニングを行う。

ターニングの後、ターンミリングによる加工を行う。ターンミリングとは、ターニングと同じように被削材を回転させながら、回転工具によるミリングを行う加工法である。図4のように、ロフトサーフェスを再度縮小し、その度に、ある高さ z_i における曲がり円柱のオフセット面との交点を記憶し、それぞれの交点の位置関係から、ターンミリン

Fig. 2 Generation of loft-surface

Fig. 3 Shape after turning

Fig. 4 Workpiece shape while turn-milling

グの際のC軸の回転可能範囲 C_i を算出する。さらに、一つの交点からもう一つの交点に向ってC軸を C_i だけ回転させることによって、図4のような干渉が起こらない工具経路を設定することが可能になる。この処理は暗黙知の形式化とまではいえないにしても、荒加工の効率化に熟練者がとる判断に類している。

以上の処理を行った後、ターニング及びパターンミリングでは加工できない部分に関しては、二つの曲がり円柱にはさまれた領域のうちから干渉が起こらないものを選択し、被削材の中心軸から曲がり円柱に対して生成した接線と平行になるような工具姿勢で切削を行う。

3. 曲がり円柱形上の仕上げ加工

3・1 工具姿勢

仕上げ加工では、曲がり円柱の軸方向に沿った工具経路を生成する。ボールエンドミルでこの曲面を加工することになるが、その際、加工面に対して相対的に一定の工具姿勢を取ることで良好な面性状を得られることが知られている⁽³⁾。そこでまず、理想的な工具姿勢を表す基準ベクトルを次の方法で設定する。

工具半径分オフセットした曲がり円柱面を、その周方向および軸方向に沿って分割し、両者が重なった点を切削点 P_{ij} とする。ただし、添え字の i, j はそれぞれ周方向、軸方向に関して何番目の点であるかを表している。また、その点における法線ベクトルを N_{ij} とする。これにより軸方向に連続する二つの切削点 $P_{ij}, P_{i,j+1}$ を結ぶベクトル v_{ij} を求め、これを次式により単位ベクトル化した後、係数 α をかけたものを修正ベクトル V_{ij} とする。なお、切削点とは工具中心点が通過する曲線を点群で表したものとする。

$$V_{i,j} = \alpha \frac{v_{i,j}}{|v_{i,j}|} \quad (1)$$

この V_{ij} を次のように法線ベクトルに足し合わせ、基準ベクトル T_{Iij} を算出する。

$$T_{Ii,j} = N_{i,j} + V_{i,j} \quad (2)$$

T_{Iij} は加工面に対して一定の工具姿勢を表す。係数 α は加工面に対する工具の傾斜量を決定する定数である。

Fig. 5 Standard tool axis vector

3・2 干渉回避

前節で設定した基準ベクトルを基に、同じ中心軸で工具径と等しい半径をもち、工具突出し量と等しい長さの円柱を生成し、これを工具と見なして干渉判定を行い工具軸ベクトルを修正する。

本 CAM システムが対象とする曲がり円柱形状は、干渉回避のための工具姿勢の修正方向が無数に考えられる。それら全てを考慮することは非現実的であり、また工具姿勢の連続性を保つためには複雑な処理が必要となり、計算時間の増大も招く。そこで、干渉回避のための工具姿勢の修正方向を、あらかじめ曲がり円柱の軸方向と周方向に限定する。この考え方による干渉回避の概要を図 6 に示す。

Fig. 6 Interference avoidance

まず、曲がり円柱との干渉を無視し、上下の円盤状の部分との干渉だけを考え、工具姿勢を曲がり円柱の軸方向に沿って修正する。工具が円盤状の部分と干渉すると判断された場合、前節で述べたように、連続する二つの切削点を結ぶベクトル $\mathbf{v}_{ij}$ を基に、次式にしたがってベクトル $\mathbf{V}'_{ij}$ を算出する。

$$\mathbf{V}'_{ij} = \beta \frac{\mathbf{v}_{ij}}{|\mathbf{v}_{ij}|} \quad (3)$$

これを前節で算出した工具軸ベクトル $\mathbf{T}_{ij}$ に足し合わせることで、修正された工具軸ベクトル $\mathbf{T}_{2ij}$ を生成する。

$$\mathbf{T}_{2ij} = \mathbf{T}_{ij} \pm \mathbf{V}'_{ij} \quad (4)$$

式(4)の処理は干渉が解消されるまで繰り返される。ただし、式(3)の係数 β は、式(4)の処理を繰り返す際、一回の処理ごとの工具姿勢の修正量を決定する定数である。また、式(4)の正負の符合は、工具と円盤状の部分との交点と切削点の位置関係から修正方向を判断し、それに基づいて決定される。

次に、曲がり円柱との干渉も考慮し、曲がり円柱の周方向に沿って工具姿勢の修正を行う。軸方向の場合と同様に、干渉が発生すると判断された場合、図 7 のように周方向に関して連続する切削点 $\mathbf{P}_{i-1j}$ 、 $\mathbf{P}_{ij}$ を結ぶベクトル $\mathbf{u}_{ij}$ を求め、これを次式により単位ベクトル化した後、係数 γ_1 をかけ、修正ベクトル $\mathbf{U}_{ij}$ とする。

$$\mathbf{U}_{i,j} = \gamma_1 \frac{\mathbf{u}_{i,j}}{|\mathbf{u}_{i,j}|} \quad (5)$$

軸方向に沿って修正を行った工具軸ベクトル $\mathbf{T}_{2i,j}$ に足し合わせることで、周方向に沿った修正を行う

$$\mathbf{T}_{3i,j} = \mathbf{T}_{2i,j} + \mathbf{U}_{i,j} \quad (6)$$

式(5)の係数 γ_1 は、一回の処理ごとの傾斜量を決定する定数であり、干渉が解消されるまで式(6)の処理を繰り返す。

Fig. 7 Change in tool axis vector along the circumference direction

ところで、この処理の繰り返しにより工具の傾斜量が大きくなると、切削を行う曲がり円柱自体と干渉する可能性がある。その場合には、傾斜量を γ_2 として以下のように新たにベクトル $\mathbf{U}'_{ij}$ を生成し、これを工具軸ベクトルから引くことで、式(6)の場合とは逆方向に修正を行う。

$$\mathbf{U}'_{i,j} = \gamma_2 \frac{\mathbf{u}_{i,j}}{|\mathbf{u}_{i,j}|} \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_{3i,j} = \mathbf{T}_{2i,j} - \mathbf{U}'_{i,j} \quad (8)$$

ただし、この処理によって修正後の工具が上下の円盤と交点をもつ場合には、ベクトル $\mathbf{U}_{ij}$, $\mathbf{U}'_{ij}$ の z 成分を無視し C 軸方向に沿って修正を行う。この場合、式(6)および式(8)はそれぞれ次のように書き換えられる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T}_{3i,j,x} \\ \mathbf{T}_{3i,j,y} \\ \mathbf{T}_{3i,j,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{2i,j,x} \\ \mathbf{T}_{2i,j,y} \\ \mathbf{T}_{2i,j,z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{i,j,x} \\ \mathbf{U}_{i,j,y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T}_{3i,j,x} \\ \mathbf{T}_{3i,j,y} \\ \mathbf{T}_{3i,j,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{2i,j,x} \\ \mathbf{T}_{2i,j,y} \\ \mathbf{T}_{2i,j,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{U}'_{i,j,x} \\ \mathbf{U}'_{i,j,y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

3・3 退避点の生成

前節までの処理により周囲の形状と交点をもたない工具軸ベクトルが算出された。しかし、図8のように、

連続する切削点において、二つの工具軸ベクトルが曲がり円柱をまたぐような場合、姿勢変化中に干渉が生じる。そこで、図9の流れに従って、このような状況を判定し、工具を一度安全な位置に退避させてから姿勢変化を行うための退避点を生成する。

Fig. 8 Interference between continuous two tool postures

Fig. 9 Generation of the escape point

図8のような状況を判断するためには、連続する切削点間で、工具と各曲がり円柱との位置関係に変化があるかどうかを判定する必要がある。そこで図9のように、曲がり円柱に1～ N までの番号 n を割り当て、全ての工具軸ベクトルに対して曲がり円柱との位置関係を示す変数 $Flag_{ij}$ を定義する。前節の式(6), または式(8)～(10)の処理において、 n 番目の曲がり円柱と干渉を回避したとき、式(6)または式(9)の場合、

$$Flag_{ij} = n \quad (11)$$

とし、式(8)または式(10)の場合は、

$$Flag_{ij} = n + 1 \quad (12)$$

として、図10のように干渉回避後の工具と曲がり円柱の位置関係を記憶する。このような処理は熟練者のやり方と同じであるか確証はないが、工学的には熟練者の暗黙知と同等であると考えられる。

Fig. 10 Example of interference avoidance by memorizing the number of bended column

4. CAM システムの構成

前節までに述べた手法を用いて、工具経路生成の流れについて説明する。まず、CAD 上で定義された目標形状から使用する被削材の寸法を決定する。加工中、工具は被削材の内部まで進入するため、被削材の半径よりも大きい突出し量が必要となる。さらには B 軸の傾きも考慮する必要があるため、工具の突出し量を被削材の直径と等しい値とする。また、目標形状のうち曲がり円柱として処理する部分を選択し、そのうちの二つの曲がり円柱同士の距離の最小値を計算する。その値を工具の直径が越えない範囲で工具径を決定する。

以上の情報を基に荒加工の工具経路が生成される。続いて、仕上げ加工用の工具を決定し工具経路を生成する。工具の決定および工具経路生成の際の干渉判定などは、全て荒加工が終了した時点での被削材の形状に基づいて行われる。荒加工および仕上げ加工の工具経路を生成する途中、決定された工具では干渉が生じない工具姿勢を見つけないことができない等の理由で加工を継続することが困難と判断された場合には処理は中断される。生成された工具経路は CL データとして出力され、ポストプロセッサを介して NC データへと変換される。

5. 曲がり円柱形状の創成加工実験

開発された CAM システムを用い、対象形状に対して実際に工具経路を生成し、シミュレーションおよび加工実験を行った。図 11 には 2 つの目標形状を示す。1 つは、中心軸に対して対称に配置された半径の等しい 3 本の曲がり円柱をもつ。他は無作為に配置された半径の異なる 4 本の曲がり円柱をもつ。図 12 には仕上げ加工のシミュレーション結果を、図 13 には加工結果を示す。加工実験では、被削材にはケミカルウッドを使用し、荒加工では $\phi 4$ スクエアエンドミル、仕上げ加工では R2 ボールエンドミルを使用した。工具突出し量はともに 60 mm である。切削点は、曲り円柱の軸方向に 400 点、周方向に 200 点配置した。また 3 章で述べた各係数に関しては、加工面に対して工具が常に 10 度の傾きをもつよう α を 5.67 とし、干渉回避における一回の処理における傾斜量が 1° となるよう β を 57.30, γ_1 , γ_2 をそれぞれ 57.30, -57.30 とした。

Fig. 11 Target shapes designed by 3D-CAD system

Fig.12 Simulated results taking account of interference avoidance

Fig.13 Machined results

Fig.14 Variation in tool posture

実験の結果、荒加工、仕上げ加工の加工時間はそれぞれ 487.2 min, 127.8 min であった。加工中、図14(a)の位置Aで工具の姿勢がやや急激に変化した。この位置は、3章において干渉回避のために工具姿勢に修正を加えた切削点とそうでない切削点の境界付近と考えられる。この境界においては、設定した β , γ の値から、図14(b)のように、干渉回避の際の工具の角度変化量が 1° となるが、このときの単位切削距離あたりの工具の角度変化は、およそ 4 deg/mm 程度と比較的大きくなるのが原因である。これは β , γ を小さくし、干渉回避の際の工具の角度変化を小さくすることで改善が可能と思われる。 α に関しては、3章で述べた良好な面性状を期待できる工具の傾斜量での範囲として $10^\circ \sim 30^\circ$ の中から最小の傾斜量である 10° を設定している。工具の傾斜量が大きければ大きいほど工具と被削材とが干渉する危険性が増すので、最小の傾斜量を設定した。

6. 結 言

本研究では、ものづくり分野に対する新たなアプローチとして、複雑な形状を複合加工機により切削する巧妙加工用のCAMシステムを開発することを目的として以下の結論を得た。

- (1) 複数の曲がり円柱から構成される複雑形状に対し、荒加工から仕上げ加工までの一貫した工具経路を生成するCAMシステムを開発した。
- (2) 開発されたCAMシステムを実際に複数の対象形状に適用し、シミュレーションおよび加工実験を行い、システムの有効性を確認した。

以上のことから巧妙加工用CAMシステム開発の第一歩とすることができたといえる。

本研究は、平成23年度科学研究費補助金（基盤研究B 23360069）のもとに行われたことを記す。また、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) 河口泰大, 中本圭一, 石田 徹, 竹内芳美, “複合加工機による鎖形状の巧妙加工”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 3112-3118.
- (2) 濱田大地, 中本圭一, 石田 徹, 竹内芳美, “入れ子を有する複雑形状の巧妙加工”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 780 (2011), pp. 3127-3136.
- (3) 大山和之, 森重功一, 竹内芳美, “5 軸制御加工におけるボールエンドミルの最適傾斜角決定方法—仕上げ面粗さを基準にした決定方法とニューラルネットワークの応用—”, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 7(1996), pp. 1019-1023.
- (4) 山田 誠, 田中文基, 近藤 司, 岸浪建史, “5 軸NC 工作機械による 3+2 軸制御金型加工に関する研究 3+2 軸制御金型加工における加工面評価”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2005), pp. 943-944.
- (5) 山田 誠, 田中文基, 近藤 司, 岸浪建史, “5 軸NC 工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究 ボールエンドミル傾斜加工における切削力解析による工具姿勢評価”, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 563-567.