旋削加工による三次元曲面の創製* (ロータリ工具を用いた旋削加工法の提案)

森本 喜隆^{*1}, 榎本 宗一郎^{*2}, 森山 貴幸^{*2}
加藤 秀治^{*1}, 中垣 勝敬^{*3}, 金子 義幸^{*4}

Realization of 3D Surface Machining by Turning (Proposal of Turning Method with Rotary Tool)

Yoshitaka MORIMOTO^{*1}, Souichiro EMOTO, Takayuki MORIYAMA,
Hideharu KATO, Katsuhiro NAKAGAKI and Yoshiyuki KANEKO

^{*1} Kanazawa Institute of Technology
7-1 Ohgigaoka Nonoichi Ishikawa, 924-8501, Japan

The machining of complex parts with the non-axisymmetric surface is persuaded by the conventional multi-axis milling machine and/or the grinding machine. Even though the machining is persuaded by the high speed cutting method, it takes long time to machine this process because the contact part between 3D surface and milling tool or grinding wheel is calculated for the tool pass that is just same as turning method. Therefore, to improve the productivity of this process, a new cutting process instead of the milling process or grinding process has been developed. We try to apply the turning process for 3D surface machining. The key factor for the turning of 3D surface is to speed up the motion of the tool post on the moving table compared with the one of the multi-axis milling machine or the grinding machine. To cope with the turning, the dedicate NC program for 3D surface by the original CAM system has been developed based on the proposed turning method. The creation of NC program including some data conversion processes from the 3D-CAD system are needed for building up tool trajectory. To create efficient and exact tool trajectory data, these conversion processes is calculated directory from the 3D surface in 3D-CAD system. It makes our original CAM system possible to extract the simple and reliable tool path for the NC program. In this report, a new turning method is proposed and the machining results based on the proposed method are reported. The performances of the control results of the CNC lathe are also evaluated by measuring the table behavior.

Key Words : 3D Machining, Turning, Rotary Tool, CAM System, Non-Axisymmetric Surface

1. はじめに

内燃機関用カムやピストンに代表される非円形加工は、回転軸を有し回転軸に直角な断面形状が非円形となる。これらの加工は研削あるいは旋削により行われ^{(1),(2)}、工作機械は専用機として市販されている。さらにこの加工方法の応用としてはクランクジャーナル軸、クランクピンの加工が挙げられ、オービット加工とも称され実用化されている。最近では、回転軸を持つ非軸対称な三次元曲面を有する部品が 3D-CAD の普及とともに一般的になりつつある⁽³⁾。このような部品を加工するためには、30~50mm 程度の工具移動量が必要となり、これに対応した

* 原稿受付 2013 年 4 月 15 日

^{*1} 正員, 金沢工業大学 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

^{*2} 学生員, 金沢工業大学工学部

^{*3} 高松機械工業(株)

^{*4} 正員, 高松機械工業(株)

E-mail: mosandb1@neptune.kanazawa-it.ac.jp

専用工作機械や加工方法が提案されている^{(4)~(7)}。これらは対象工作物が高硬度材であるため、いずれの場合も研削により仕上げ加工が行われている。三次元曲面の加工については、高速切削加工技術の発展により、ボールエンドミルを用いて工作物回転軸を割出ながら多軸同時加工を行う加工が確立されている。この場合、曲面を回転軸方向に稜線加工する方法、あるいは工作物を割出しながら回転軸に対して直角な断面形状を輪郭加工する方法により最終形状を創製する。しかし、この加工方法は工作物が高硬度材の場合、高速加工といわれる加工条件で加工してもボールエンドミルの工具剛性、一刀当りの切込み量、送り速度の制限から、加工時間が長くなり生産性の向上が求められている。

一方、高速加工技術の発展に伴い、工作機械の送り駆動系の高速化を実現するために、リニアモータ駆動テーブルを搭載したものも多くみられるようになってきている。中には 19.8m/s^2 (2G) を超える加速度を実現しているものもあり、非円形工作物の加工用工作機械として用いられる場合もある^{(7),(8)}。また、FTS (Fast tool servo) に代表される切込み動作を高速で行う工具台は⁽⁹⁾、内燃機関用ピストンをはじめ、回転軸を有する軸対称非円形工作物の加工に用いられているが、現状では工具移動量が 1mm 以下のものが多く工作物が限定される。

三次元曲面の旋削加工を実現するには、直径指令と工具配置を考慮して $60\sim 100\text{mm}$ 程度の工具移動量を持ち、 75m/s^2 程度の高加速度運動、軌跡誤差 $\pm 50\mu\text{m}$ 以内を可能とする工具台あるいは移動テーブルの開発が必要となる。これにより従来の非円形工作物の旋削加工法を発展させた回転軸を有する非軸対称三次元曲面の旋削加工の実現が期待できる。

そこで本研究では旋削加工による三次元曲面の創製の実現を目的とし、加工方法の提案、専用 CAM システムの開発および前述の性能を達成する CNC 旋盤の開発を行ったので、三次元曲面の旋削加工実証結果と併せて報告する。

2. 旋削による三次元曲面加工方法

図1に示すような回転軸を有する非軸対称三次元曲面からなる工作物の旋削加工を考える。この形状をマシンングセンタや CNC 研削盤で加工する場合、工具—工作物の接触点または接触弧から工具軌跡を求めて加工するが、回転軸を有する非軸対称三次元曲面の場合、非円形旋削加工技術を応用すれば旋削加工が可能となる場合がある。そこで本研究では、この加工工程を旋削に置き換える方法について以下に提案する^{(10),(11)}。

2・1 三次元曲面加工を可能とする工具設置方法の提案

図1に示す工作物はベースサークルから 10.57mm 程度のリフトを有する三次元曲面形状からなる。本研究では最終的にこの工作物形状でかつ高硬度材 (SCM430, SKD11 焼入鋼) の非軸対称部品の旋削加工を目指している。

Fig.1 An example with non-axisymmetric 3D surface

Fig.2 Conventional tool layout for 3D surface workpiece for CNC lathe

Fig.3 Interference between tool and workpiece

研削加工やミリング加工による加工時間を比較すると、旋削加工のそれは 1/10 程度の加工時間に短縮できることが予想され、高速化の達成が期待できる。旋削加工において高硬度材を加工するためには切削速度を上げることが出来る駆動型ロータリ工具による切削が必要となる⁽¹²⁾。そこで本研究では図 2 に示すように駆動型ロータリ工具を用いることとする。駆動型ロータリ工具は、難削材の荒、中仕上げに用いられることが一般的であり、工具回転軸を主軸に対して傾斜させることもある⁽¹³⁾。これに対して本研究ではロータリ工具を垂直に配置して使用する。この理由は以下のとおりである。

- 1) 図 1 に示す工作物を対象とする場合、工具を垂直配置すると曲面の曲率から加工可能な工具直径を選定しやすい。ここではロータリ工具径を $\phi 10$ としている。
- 2) 図 2 に示すように刃物角 α は工具－工作物間の干渉を回避することを優先する場合、鋭角とすることが望ましい。現在は高速で切込み動作を行う工具の剛性を優先して、すくい面を円筒端面とし、すくい面を円筒端面とし、逃げ面と円筒面とのなす角つまり刃物角 α が 90° となる円筒形状を採用している。
- 3) CNC 旋盤の移動軸により構成される X-Z 平面と円筒形状のロータリ工具のすくい面が平行となるように、上向きあるいは下向きに配置することにより曲面加工用工具軌跡データ算出が容易になる。
- 4) 加工後の形状評価を考慮すると、加工点と計測点とを一致させやすく、加工誤差の算出が容易となる。

2・2 垂直方向工具位置オフセットの検討

旋削加工において、工具すくい面は通常、図 3(a), (b)に示すように工作物回転中心の水平方向中心線に合わせる。三次元曲面を旋削加工する場合、工具－工作物が接触している加工点と Z 軸回転中心を結ぶ回転半径が常に変化する。このため、三次元曲面を持つ工作物の場合、この工具配置では工具切れ刃以外の工具逃げ面で接触、干渉することがある。三次元曲面の旋削加工を実現する工具配置とは、工具の切刃の代表点が常に三次元曲面に接触しながら加工する場合であるので、三次元曲面の表面が工具の逃げ面のみと干渉する場合は加工が不可能となる^{(1), (2)}。

本研究では、この問題を解決する方法として、図 3(c)に示すように工具位置を垂直方向に l だけオフセットすることを提案する。本来、旋削加工におけるすくい角は一定であるが、三次元曲面を切削する場合、すくい角は加工点と曲面の接触状態が変化するため常に変動する。我々が提案する工具位置を垂直方向にオフセットする方法においてもすくい角は変化する。このすくい角の変動範囲が所定の値となるように垂直方向オフセット量を求め、工具－工作物間の干渉のない三次元曲面の旋削加工を実現する。

2・3 すくい角算出結果に基づく工具位置オフセットの決定

工具位置オフセット量は工作物形状によりその都度定める必要がある。また、工具－工作物間の干渉も考慮する必要がある。これらの問題に対応するため 3D-CAD を用いて工具軌跡に従い工具と工作物の干渉を確認するこ

Fig.4 Interference part by conventional tool layout

Fig.5 Proposed machinable tool layout

とが望ましい。特にロータリ工具を用いた三次元曲面の旋削加工の場合、切削点もしくは切削弧がすくい面の円周で常に変化することから、平板カムのように二次元平面で幾何学的に干渉状態を確認することは困難となる。そこで本研究ではあらかじめ代表的な工作物断面を選定し、この輪郭線上の代表点におけるすくい角を算出することにより加工可能な工具の垂直位置オフセット量を求めておき、最終的には3D-CADで干渉を確認する方法を採用している。

図4に示すように、工具位置のZ軸座標を定めて、加工点を通る工具すくい面上の水平線aと加工点における曲面の法線とのなす角によりすくい角 ϕ_{i0} が決まり、これが工作物の回転とともに変化する。三次元曲面の場合、加工点が工作物の回転とともに移動するとき、円筒面の加工とは異なり、主軸一回転中に加工点の切込み位置が変化することになる。一方、水平線aと加工点を通る工具逃げ面上の直線cとのなす角 θ は工具形状つまり刃物角に依存し一定値となる。ここで、三次元曲面の加工点においてはすくい角 ϕ_{i0} が変動することに着目する。工具が工作物を加工できる条件は、工具の逃げ面が工作物と干渉する条件と相反し、すくい角 ϕ_{i0} と θ を用いて以下のように表わされる。

$$\frac{\pi}{2} + \phi_{i0} \leq \theta \quad (1)$$

ただし、すくい角の正負が式(1)で考慮されていることに注意を要する。図3(a), (b)および図4は ϕ_{i0} が正となり工具逃げ面と工作物が干渉するため加工できない状態を示している。

そこで、この干渉問題を解決するために、図3(c)および図5に示すように工具位置を図中Y軸方向にlだけオフ

Fig.6 Determination of machinable range by calculation of rake angle

セットする。ここで、使用するロータリ工具の刃物角が 90 度であるので θ も 90 度となる。工具すくい面上の水平線 a と加工点における曲面の法線とのなす角 ϕ_i は再びすくい角を示し、工作物を加工可能とするために、 ϕ_i が負となるように工具位置をオフセットすればよい。つまり、すくい角の変動範囲を $0 \sim -90^\circ$ とすることが必要となる。すくい角が -90° では工作物加工面がすくい面と接する状態を指し実際には加工困難と予想されるが、少なくとも幾何学的には工具—工作物間に干渉が生じないことからオフセット量の算出範囲に含めている。

図 6 は、主軸回転角度に対して ϕ_{i0} と ϕ_i を求めた結果を示している。図より、工具を芯高に配置した場合のすくい角 ϕ_{i0} は 0 度を超える箇所が現れており加工が不可能な場合があることを示している。この領域では切れ刃以外の工具逃げ面と工作物が干渉していることになる。これに対して、図 5 に示す工具位置におけるすくい角 ϕ_i は、図 6 ではすくい角が 0 度を超える箇所は現れず全て負のすくい角となるため、工具逃げ面と工作物の干渉は発生せず常に加工点が切れ刃と接しながら加工できることとなる。これにより三次元曲面を旋削により加工できる工具オフセット l を求めることができる。工具と工作物の干渉に関しては三次元空間で考慮する必要があるため、3D-CAD 等を用いて詳細に検討することが必要である。

ここで、ロータリ工具の直径の制限から切削領域が弧となることにより加工形状が制限される。次章では、このことを考慮した NC プログラムの作成方法について述べる。

3. 工具位置オフセットに対応した旋削加工用 NC プログラムの作成

3・1 専用 NC データの作成

通常の旋削加工であれば、加工プログラム中に記述する工具位置は X 軸座標と Z 軸座標となる。しかし、三次元曲面を旋削加工する場合は、主軸回転角度位置 (C 軸座標) も指令する必要がある。そこで切込み量 (X 軸座標) と送り量 (Z 軸座標) に加え主軸回転角度位置 (C 軸座標) を指定することとし、CAD データを基に作成した加工経路を指令値に用いた三軸同期制御方式により加工を行う。ここで、加工による形状誤差を補正することを想定すると、市販の CAM システムでは、これらを総合的に処理することができないため、提案する手法に基づき工具経路を算出し、かつ誤差の補償を可能とする専用 CAM システムを作成した。

本研究では、CAD データならびに CAM システム内での形状データは 10nm を最小設定単位としている。これに合わせて NC 制御装置で用いるデータも 10nm 単位で計算を行う。その他の数値については有効数字 3 桁としているが、制御装置内部のパラメータ設定値と機械仕様および加工条件については例外的に整数値のみ、あるいは慣用的に用いられる数値で示す。

3・2 NC プログラムの作成手順

本研究の加工対象となる回転軸をもつ非軸対称三次元曲面を旋削加工するためには、工具軌跡が工作物表面をらせん状になぞるような点列データからなる軌跡を求める必要がある。市販の CAM では、回転軸に直角な断面と工作物との交線から点列を生成することは可能であるが、これでは旋削加工用の点列生成には適さない。そこで我々は 3D-CAD を用いて、工作物の曲面に工具すくい面との交線を作成して、これを基にスプライン曲線を作成し、加工経路を算出することとした。以下に具体的な作成手順を示す。

(1) 形状データの読み込み

IGES 形式、Para solid 形式などで記述された三次元曲面を 3D-CAD に読み込む。この時曲面の精度は特に重要な問題となる。提案する旋削加工法を適用する場合、加速度が 100m/s^2 を超えるような動作が工具切込み時に要求される場合もある。具体的には、主軸 1 回転当り 720 データの輪郭加工を制御周期 0.222ms で行う場合、切込みのために工具移動テーブルが静止状態から 0.222ms の間に $\Delta x = 4.92\ \mu\text{m}$ 移動させると、この間の加速度は近似式 $\ddot{x} = \Delta x / \Delta t^2$ より約 100m/s^2 となる。このとき移動軸の位置分解能は最低でも 10nm とすることが望まれる。ここで、3D-CAD で三次元曲面を作成する際には設計形状に対する許容値の設定があり、この値が時として数十 μm になる場合があるため、三次元曲面の CAD データの作成および読み込みには、このことを事前に確認する必要がある。

(2) 送り軸移動方向に沿った断面スプライン曲線の作成

3D-CAD 内で図 5 に示すような主軸回転位置にあるときを例に挙げて工具経路の作成方法について述べる。ここでは、工具位置を図 6 により求めた位置 ($l=12.8\text{mm}$) とした場合を考える。このとき三次元曲面と工具すくい

Fig.7 Tool radius offset

Fig.8 Calculation of tool trajectory

Fig.9 Connection of calculated points

面を含む平面とは交線が生じる．このうち、工具と接している交線は、図7の赤実線に示すように3D-CAD上でスプライン曲線として表される．ここで、本研究ではロータリ工具の端面により加工することから切削領域が弧となる．したがってこの平面における工具－工作物間の干渉を避けるためにはスプライン曲線の曲率が工具半径よりも大きい場合に提案手法を適用できる．旋削加工であるため、主軸一回転ごとの工具送り量により、この交線上に工具が接する．提案手法では、通常の旋削加工における工具の刃先半径補正と同様にスプライン曲線がロータリ工具の半径より大きな曲率となる場合のみ対応できる．また、スプライン曲線の初期値および終端値はスプライン曲線の開始位置および終了位置での接線の傾きにより決定される．

このとき、切込み量に相当する交線上のX軸方向位置 x_i は、ある主軸回転位置 ϕ で、Z軸方向位置 z_i に関するスプライン曲線として以下の式で表すことができる．

$$x_i = f_{\phi}(z_i) \quad (2)$$

ただし、 $f_{\phi}(z_i)$ は主軸回転位置における工具のZ軸座標 z_i により決定されるX軸座標 x_i を表わすスプライン関数である．この曲線から主軸回転位置ごとに必要な数だけ点群を求めておく．旋削加工を行うためには工作物

を一定回転数で回転させ、工具送り量も一定とすることが望ましい。したがって、主軸回転位置ごとに求まるスプライン曲線から送り量を一定として z_i 座標を等間隔にし、式(2)から x_i 座標を算出しておく。

(3) 工具半径を考慮した工具位置の算出

三次元曲面の旋削加工を行う場合、使用するロータリ工具径を考慮して、スプライン曲線に対して法線方向に工具半径だけオフセットする必要がある。そこで、図7の赤実線で示す加工点での点群データを用いて、法線方向に工具半径だけオフセットする。この処理により工具中心位置 (x_{ri}, z_i) が算出できる。図7では工具中心点を接続する青実線となる。

(4) Z軸送り量を考慮した工具位置の再計算

工具半径オフセット処理を行うと、ロータリ工具の中心点からなる点列は、前述の図7青実線で示すようにZ座標位置 $z_i (i=1, 2, \dots, n-1, n, n+1)$ が一定間隔とはならない。このため、これを加工経路とした場合、主軸回転位置と同期して切込み位置制御と同時に送り方向位置制御も行う必要があり、結果的に送り速度が変化することになる。そこで本研究では通常の円筒面の旋削加工と同様にZ軸送り速度を一定にするため、図8に示すように再度式(2)と同様に、点群のZ座標位置 z_i が一定間隔となるように補間する。なお、送り量を一定とした場合、各回転位置の切削開始位置は $F\phi/2\pi$ だけ端面から軸方向に移動して始まるため、式(2)は次式のように表わされる。

$$x_{ri} = f_{r\phi} \left(F \cdot \left(\frac{\phi}{2\pi} + k \right) \right) \quad (3)$$

ただし、 $f_{r\phi}$ は工具半径オフセット後の工具中心位置 (x_{ri}, z_i) を含む区間のスプライン関数、 F は送り量 mm/rev、 ϕ は工作物の回転位置、 k は加工開始からの工作物の回転数を示す。この処理により、三次元曲面を旋削加工する場合、切込み方向には回転位置と同期した制御を、送り方向には回転位置と同期しかつ送り量が一定となるように制御することが可能となる。

(5) 旋削加工用工具位置データの算出

式(3)に従い図9に示すように回転角度ごとに求めた点列データを旋削加工用の位置データに並び替えることにより三次元曲面を旋削加工するための工具位置データを求める。

(6) NCプログラムの作成

CNC旋盤の動作に必要なモダル指令等と算出したデータを記入したNCプログラムを作成する。

4. 三次元曲面加工に用いる CNC 旋盤

4・1 CNC 旋盤の概要

提案する手法に基づき三次元曲面を旋削加工するために用いる CNC 旋盤には、工具台移動軸の高応答性と高精度位置検出機能を併せ持つことが要求される。そこで、主軸移動型旋盤で、主軸移動軸と工具台移動軸の駆動にリニアモータを採用した CNC 旋盤を用いて加工を行う。送り軸構成は、切込み動作を高速で行うために主軸

Fig.10 Appearance of CNC lathe

Table 1 Specifications of developed CNC lathe

Items	Specification	Value	Eng. unit
Head stock	Max. spindle speed	10000	min ⁻¹
	Power of main motor	1.0/2.64	kW
	Stroke in Z direction	200	mm
	Max. acceleration in Z axis	12.1	m/s ²
Carriage Bed	Stroke in X direction	90	mm
	Max. acceleration in X axis	98.1	m/s ²
	Mass	26.4	kg
	Total size	720×498×1300	mm

移動テーブル(Z軸)と工具台移動テーブル(X軸)とを独立させており、刃物台も軽量化している。また、回転角度位置制御のためにC軸割出機能を搭載している。特にX軸位置検出は前述のように高精度に検出する必要があるため、分解能10nmのリニアスケールにより行う。一方、Z軸とC軸については速度一定動作となるため高応答性は必ずしも必要とされない。図10にCNC旋盤の概要と表1にCNC旋盤の主な機械仕様を示す。

4・2 CNC 旋盤の工具台移動テーブルの動特性

リニアモータ駆動 CNC 旋盤の工具台移動テーブルの挙動、応答性を評価するために周波数応答試験を行うとともに、移動テーブルを図11に示すブロック線図でモデル化した。まず、式(4)に示す等価伝達関数 $G(s)$ は、制御系を1次遅れ系とむだ時間要素とし、リニアモータ駆動テーブルを2次遅れ系として構築している。

Fig.11 Block diagram of X axis table

Fig.12 Bode diagram of experimental and calculated results

Fig.13 Control system of CNC table

$$G(s) = \frac{K_1}{T_s + 1} e^{-Ls} \cdot \frac{K_2 \cdot F}{ms^2 + cs + K_2 \cdot F} \quad (4)$$

式(4)において、NC 制御装置の時定数を $T_s = 0.0018$ (設定値)、むだ時間を $L = 0.0173$ (実測値)、指令値ゲイン $K_1 = 1$ (設定値)、位置比例ゲインを $K_2 = 21600$ (設定値)、推力変換係数を $F = 95$ (設定値)、コイルを含むテーブル部の質量を $m = 26.5\text{kg}$ (実測値)、直動軸受の減衰係数を $c = 844\text{N/(m/s)}$ (推定値)として伝達関数を求めた。ここで、1次遅れ系についてはNC 制御装置の応答から求めている。2次遅れ系については、減衰係数をメーカーの技術資料を基にした推定値を初期設定し、これを変化させて実測伝達関数と合成伝達関数との誤差が最小となるように繰返し計算により求めたものである⁽¹⁴⁾。減衰係数の同定については種々の方法があるが、場合によっては伝達関数の合成結果に誤差が少なくなるようにさらに調整が必要となる場合もある。

実測伝達関数は、正弦波状の位置指令を入力し、その時のテーブル応答を測定することにより伝達関数を測定した。図 12 に、式(4)を用いて算出したものを実線で示し、実測値はプロット点で示す。実測値と計算値はよく一致しており、約 20Hz 付近まで十分な応答性が得られている。また、共振周波数も 50Hz までの領域では見られないことから、これを用いて三次元曲面の旋削加工を行う。指令値は先に述べた手法により求めるが、系の伝達関数が精度良く求められたので、予めフィードフォワード項を追加した補正入力も準備して実験を行う。

5. 三次元曲面の旋削加工実証実験

5・1 加工に用いる CNC 旋盤の切込み制御

CNC 旋盤は、作成した NC プログラムにより与えられた軌跡指令に従い三次元曲面の旋削加工を行うが、高速加工時の切込み制御は図 13 に示すように位置フィードバックにより行われる。本研究では、さらに加工中のテーブル動作をリニアスケールにより計測した結果を基に移動テーブルの軌跡誤差を修正する方法を採用している。ここでは、CAM により作成した NC プログラムによる制御と、テーブル動作を繰返し補償する繰返し制御、フィードフォワード項を追加した修正指令値による制御の三種類を採用し、空運転によりこれらの手法の性能を比較、確認する。

5・2 空運転時のテーブル挙動

作成した NC プログラムを用いて、テーブル挙動を図 13 に示すように X 軸テーブルに設置されたリニアエンコーダを用いて測定する。まず、CAM システムにより算出した指令値により動作させたときのテーブル挙動を図 14 に示す。テーブル位置データは、リニアスケールの出力を用いているが、テーブル動作開始時の時間管理ができないため、動作開始と思われるところで、それぞれ取得したデータをそろえている。ここでは、ロータリ工具を設置した状態で動作評価を行っている。加工対象となる三次元曲面形状は、主軸一回転中 40% 程度の間、回転半径が一定となる区間がありこの間 X 軸は静止する。このため、三次元曲面形状部になるたびに X 軸テーブルは図 14(a)に示すように大きな加速減速を繰返す。そこで断面形状が最大 10.57160mm となる個所におけるテーブル挙動を評価する。図 14(a)より、テーブル動作は全体によく追従しているが、測定値は最大 9.93330mm を示しており、指令値に対して 0.63830mm の偏差を示し、94% 程度の動作にとどまっている。また、このときの加速度を比較すると、指令値では -79.1m/s^2 (8.06G) 程度に対して -51.1m/s^2 (5.21G) と 64.6% 程度にとどまっている。また、応答遅れが見られ形状全体も広がっている。

そこで、作成した NC プログラムの位置データを基に、テーブルの追従性を補償するために、繰返し制御による修正指令値とフィードフォワード項を付加した修正指令値とによるテーブル動作を比較したものを図 14(b)に示す。指令値の最大到達位置が前述と同様 10.57160mm 対し、繰返し制御により 10.57993mm (偏差+8.33 μm)、フィードフォワード制御により 10.56746mm (偏差 - 4.14 μm) にまで改善している。本研究では三次元曲面形状が旋削加工可能であることを証明することを最優先としているため、断面形状許容誤差を $\pm 50\mu\text{m}$ 程度としている。したがって実際の加工における形状精度については空運転時の挙動からは判断できないが、テーブルの挙動自体は最大ストローク付近では十分に要求性能を満足している。

次に、図 14(c)および図 14(d)に、この断面における三次元曲面形状の起伏の立上がりと減速終端付近の繰返し制御およびフィードフォワード補正項を付加した制御のテーブル位置測定結果を示す。両者ともにテーブル動作の追従性が向上していることが確認できる。また、加速度は、図 14(a)に示すように 73.4m/s^2 を得ており、ほぼ目標値と同等の値を示しており、良好な応答性が得られている。

図 15 は、これら 3 種類の位置指令値を用い、設計軌跡と各応答間の偏差を示したものである。ここで、各応答には時間遅れがあるため、設計軌跡と応答との誤差が最も小さくなるように、応答データを移動させて比較している。偏差の最大値は図 14(a)および図 15 中の D で示す付近において発生している。CAM システムからの加工軌跡による指令値を用いると最大 $830\mu\text{m}$ 程度の偏差が発生している。これに対して繰返し制御における偏差は、 $-45.94\mu\text{m}$ から $+36.30\mu\text{m}$ 以内に収束しており、当初の目標性能である軌跡誤差 $\pm 50\mu\text{m}$ 以内を達成している。ここで、繰返し制御結果の偏差には 115Hz 付近の周期的な変動成分が現れている。これは X 軸が動作していないときには発生せず、切込み動作時のみ発生している。目標ストロークが 11mm 以内の運動では、リニアモータの磁石の極性間隔が 47mm であることから、推力リップル特性も無視できることを確認している。したがって、現状ではテーブルのヨー特性とテーブルの端部のリニアスケール取付け位置および取付け剛性が影響していると考えられる。この問題を解決することとテーブルの応答性を向上させることにより、さらに偏差を減少させることが可能となると思われる。

Fig.14 Measurement results of X-axis table behavior

Fig.15 Comparison of deviations by control methods

一方、フィードフォワード補正項を付加した指令値による偏差は、 $-255.70\mu\text{m}$ から $+155.75\mu\text{m}$ を示しており、動作開始、終了時および最大ストローク量付近の挙動は改善されているが、加速度の変曲点における偏差が大きく、繰返し制御の方が有効であることが確認できる。これらの結果から、次節の加工実験では繰返し制御により修正した指令値を用いることとする。

5・3 旋削加工実証実験

本研究の主目的は三次元曲面の旋削加工による創製である。先のテーブル動作実験からテーブル挙動には誤差が含まれているため、工作物には加工誤差を含めた形状誤差も発生することが予想される。しかし、ここでは厳密な形状精度評価よりも、加工経路算出方法に基づき加工中に工具が工作物と干渉せずに加工できること、三次元曲面が創製できることを優先して加工実証実験を行い、加工後の工作物外観を検証することとした。そこで、表 2 に示す加工条件を用いて、工具軌跡が工作物に精度よく転写されるマシンブルックスと快削黄銅 C6304B とを用いて加工実験を行った。図 16(a)にマシンブルックスの加工結果を、(b)に快削黄銅の加工結果を示す。両者ともに工具の干渉痕も見られず良好な加工面が得られている。これにより、回転軸を有する非軸対称三次元曲面を、ロータリ工具のオフセット位置を考慮することにより旋削加工できることが実証された。

Table 2 Cutting conditions

Items	Value	Eng. unit
Spindle revolution	750	min^{-1}
Feed	0.2	mm/rev
Depth of cut	0.2	mm
Tool revolution	750	min^{-1}
Tool offset	12.8	mm
Control method	Synchronized control	
Workpiece material	Machinable wax C6304BD

(a) Machined profile of machinable wax

(b) Machined profile of brass alloy

Fig.16 Machined results of 3D surface by proposed turning method

高硬度材（SCM430, SKD11 焼入鋼）については、切削抵抗とテーブルのサーボ剛性によって、指令値とは異なる実切込み量となることが予想されるため、工作機械の応答性の改善、工作物の形状精度評価とそれに基づく修正指令値を用いた加工による工作物形状の高精度化が今後必要となるが、提案する手法により旋削加工の新たな可能性が示唆された。

6. おわりに

三次元曲面を旋削加工により創製するための手法の提案と、これを実現するための CNC 旋盤の開発および加工実証実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 旋削加工により三次元曲面を創製するための工具姿勢について検討し、第一の条件として、負のすくい角となるようにロータリ工具すくい面と工作物回転中心からの垂直方向オフセット量を設定することが必要であることを明らかにした。第二の条件として、工具すくい面を含む平面と工作物との交線の曲率半径がロータリ工具の半径よりも大きいことが必要であることを明らかにした。
 - (2) 主軸と同期して高速で切込み制御を行う旋削加工用工具経路の生成方法を提案した。
 - (3) 三次元曲面加工を実現するためにリニアモータ駆動テーブルを採用した CNC 旋盤を開発し、高速動作時の目標軌跡精度が $-45.94 \mu\text{m} \sim +36.30 \mu\text{m}$ 以内に収束すること、最大加速度 73.4m/s^2 に到達することを確認した。これにより三次元曲面の旋削加工に適用可能となる移動テーブルの応答性を得た。
 - (4) 提案する手法を用いて、三次元曲面を旋削加工により創製できることを加工実証実験により確認した。
- 今後の課題としては、形状精度の評価方法、評価結果に基づく加工精度の向上、テーブル応答性の向上、さらには種々の工作物に対応した加工技術の確立が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費助成事業基盤 C235601390 の助成を得て行われた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 米田孝夫, 鈴木郁男, 辻内敏雄, “非円形状 NC 輪郭研削加工に関する研究”, 精密工学会誌 Vol. 56, No.12 (1990), pp. 2297-2302.
- (2) Mi-Ching, T., Yaw-Hwei, L., “Tracking Control of a Software Cam Machining System”, *Transactions of the ASME, Journal of dynamic systems measurement and control*, Vol.121, No4, (1999), pp.729-735.
- (3) Taki, I., Nakamura, M., et al, “Development of a motorcycle engine with a three-dimensional cam for continuous variable valve lift and timing mechanism”, *SAE International Journal of Engines*, Vol.1, (2009), pp1357-1365.
- (4) 秋山弘礼, 小倉 勝, 佐々木 富幸, “3 次元カム加工用 4 軸 NC 工作機械の開発”, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集 (2004), pp.325-326.
- (5) 豊田工機, 工作物の回転軸方向傾斜面の研削方法, 特開 2005-254405 (2005).
- (6) コマツ NTC, カム面の研削方法, 特開 2010-89225 (2010).
- (7) 中垣勝敬, 森本喜隆, 鈴木直彦, 金子義幸, 磯部稔, “非円形加工を可能にしたリニアモータ駆動 CNC 旋盤の開発”, 精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, (2010), pp.27-28.
- (8) Morimoto, Y., Suzuki, N., Taki, I., Kato, H., “Development of NC turning machine for 3D non-circle cutting”, *Proceedings of CIRP HPC*, Vol.2, (2010), pp. 165-170.
- (9) 岡崎祐一, “圧電素子を用いた微小変位工具台”, 精密工学会誌, Vol. 54, No. 7, (1988), pp. 1375-1380.
- (10) Morimoto, Y., Emoto, S., Moriyama, T., Kato, H., “Creation of Curved Surface by Lathe Turning”, *Procedia CIRP*, Vol.1, (2012), pp. 114-119.
- (11) Morimoto, Y., Moriyama, T., Emoto, S., “Development of Linear-Motor-Driven NC Table for High-Speed Machining of 3d Surface by Lathe Turning”, *Procedia CIRP*, Vol. 1, (2012), pp. 271-276.

- (12) Kato, H., Shikimura, T., Morimoto, Y., “A study on driven-type rotary cutting for finish turning of carburized hardened steel”, *14th International Conference on Precision Engineering, Key Engineering Materials*, Vol.523-524, (2012), pp250-255.
 - (13) 山本博雅, 佐竹健太郎, 笹原弘之他, “駆動型ロータリ切削による難削材の高効率加工における MQL の効果”, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 3, (2011), pp. 316-321.
 - (14) 松原厚, 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版.
-