

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560139

研究課題名(和文)非円形旋削加工による3次元曲面の創製

研究課題名(英文)Realization of 3D surface machining by turning

研究代表者

森本 喜隆 (Morimoto, Yoshitaka)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00290734

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：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60~100mm程度の工具移動量を持ち、7G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。

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旋盤の開発を行い、三次元曲面の旋削加工が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：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.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学

キーワード：工作機械 CNC旋盤 CAM 非円形加工

1. 研究開始当初の背景

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、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。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、これに対応した専用工作機械や加工方法が提案されている。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、一刃当りの切込み量、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。

2. 研究の目的

3次元曲面の加工は、一般にミーリング加工、研削加工により行われている。近年開発された3次元曲面から構成されるガソリンエンジン用3次元カムは、ガソリンエンジンのCO2排出量削減に有効とされるバルブタイミング、バルブリフト量の連続可変制御をコンパクトに実現でき、特に軽自動車、2輪車にとって次世代技術の核として期待されている。しかし、実用化のためには現状の研削加工による加工能率の制限があり、より高効率加工手法の確立が求められている。そこで本研究では、この3次元曲面の旋削加工を実現するために、能動型ロータリ工具を搭載したリニアモータ駆動NC旋盤を核とした加工・評価システムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

研究の遂行は以下に示す工程に従い3年計画で行った。

(1)平成23年度：

- ・3次元曲面用CAMの開発、加工形状評価手法の開発およびロータリ工具の切削特性の解析。

(2)平成24年度：

- ・リニアモータ駆動NC旋盤による制御系の動特性を考慮した補正指令値の算出および機上計測結果を用いた補正指令値算出手法の確立。
- ・ロータリ工具の形状評価および加工条件選定の実験的解明。

(3)平成25年度：

- ・3次元曲面加工用工作機械の総合性能評価

と実用化部品の事例評価。

4. 研究成果

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、以下の成果を得た。

(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。この干渉問題を解決するために、図1,2に示すように工具位置を図中Y軸方向に*l*だけオフセットする。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は再びすくい角を示し、工作物を加工可能とするために、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~-90°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3は、主軸回転角度に対するすくい角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は0度を超え

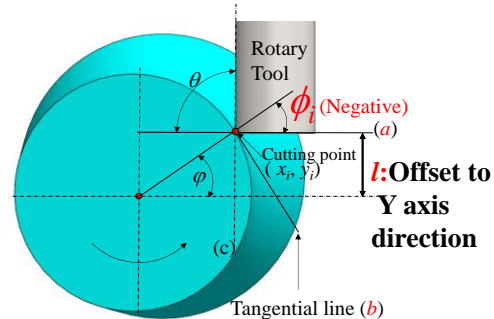


図2 工具姿勢の決定

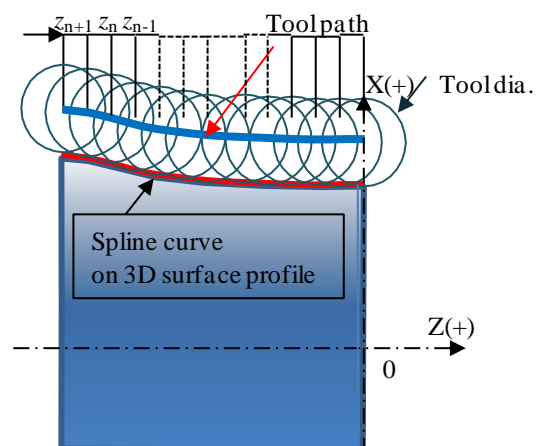


図1 工具軌跡の算出

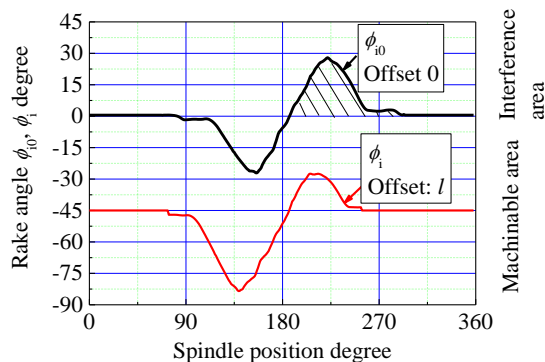


図3 主軸位置に対するすくい角の変化

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3に示す工具位置におけるすくい角はすくい角が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。

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) 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

表1 開発した CNC 旋盤の仕様

Items of specification		
Head stock	Max. spindle speed [min^{-1}]	10000
	Power of main motor [kW]	1.0/2.64
	Stroke on Z direction [mm]	200
	Max. acceleration on Z [m/s^2]	12.1(1.23G)
Carriage	Stroke on X direction [mm]	90
	Max. acceleration on X [m/s^2]	98.0(10G)
	Weight [kg]	26.4
Bed	Size [mm]	720×498×1300

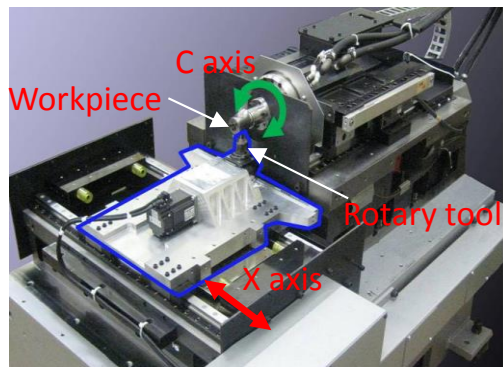


図4 開発した CNC 旋盤

表2 加工条件

	Description	RCGT1003M0-AL	
Cutting tool	Material	Coated cemented carbide K01	
	Edge radius	5	mm
Workpiece material	D2(ASTM)	Hrc59	
Spindle revolution	375	min^{-1}	
Feed	0.2	mm/rev	
Depth of cut	0.1	mm	
Tool revolution	375	min^{-1}	
Tool offset	12.8	mm	
Control method	Synchronized control		
Coolant	Dry		

工作物外観を検証することとした。そこで、図4および表1に示す仕様のCNC旋盤を用いて、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ナブルワックスと快削黄銅 C6304B とを用いて加工実験を行った。図5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



図5 加工結果

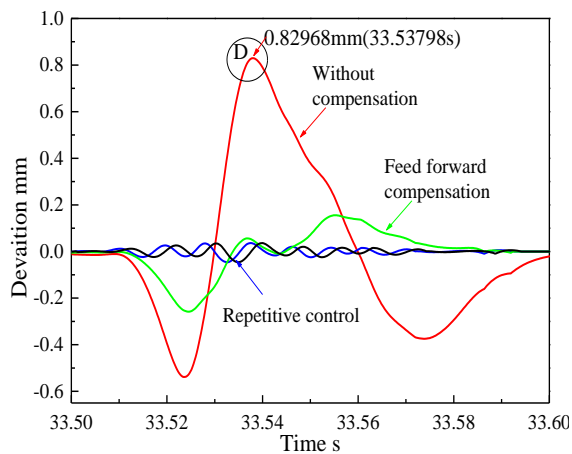


図 6 動作の精度検証結果

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。

(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。

図 6 は、設計軌跡に基づく位置指令値と各応答間の偏差を示したものである。偏差の最大値は図中の 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。

(4) 提案する手法を用いて、図 5 に示すような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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) 旋削加工による三次元曲面の創製, 森本喜隆, 加藤秀治, 榎本宗一郎, 森山貴幸他, (ロータリ工具を用いた旋削加工法の提案), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.79, No.804, pp276-288, (2013), 審査有
- 2) Hideharu KATO, Yoshitaka MORIMOTO, Study on High-Efficiency Finish Turning of

Carburized Hardened Steel with Driven Rotary Cutting, Int. J. of Automation Technology, Vol.7, No.3, (2013), 審査有

- 3) Yoshitaka MORIMOTO, Katsuhiko Nakagaki, Hideharu KATO, Machining of Non-axisymmetric Curved Surface by Lathe Turning, Proceedings of 2013 ASME IMECE, IMECE2013-63317, (2013), 査読有
- 4) Yoshitaka MORIMOTO, Katsuhiko Nakagaki, Hideharu KATO, Development of linear-motor-driven NC table for high-speed Machining of 3d Surface by Lathe Turning, Procedia CIRP, Vol.1, pp.271-276, (2012), 審査有
- 5) Yoshitaka MORIMOTO, Katsuhiko Nakagaki, Hideharu KATO, Creation of Curved Surface by Lathe Turning, Procedia CIRP, Vol.1, pp.114-119, (2012), 審査有

〔学会発表〕(計 2 件)

- 1) Yoshitaka MORIMOTO, Soichiro Emoto, Hideharu KATO, Development of linear-motor-driven NC table for high-speed Machining of 3d Surface by Lathe Turning, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, (2012,6,4), Swiss ETH Zürich
- 2) Yoshitaka MORIMOTO, Takayuki Moriyama, Hideharu KATO, Creation of Curved Surface by Lathe Turning, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, (2012,6,4), Swiss ETH Zürich

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称: 旋削による非円形加工方法

発明者: 森本喜隆

権利者: 森本喜隆

種類: 特許

番号: **特許 5413913 号**

取得年月日: 2013 年 11 月 22 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本喜隆 (MORIMOTO, Yoshitaka)

金沢工業大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号: 00290734

(3) 連携研究者

新谷一博 (SHINTANI Kazuhiro)

金沢工業大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号: 80139758

加藤秀治 (KATO Hideharu)

金沢工業大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号: 90278101