

令和元年5月27日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03905

研究課題名(和文)非軸対称三次元曲面旋削・研磨加工システムの開発

研究課題名(英文)Development of Turning and Polishing System for Non-axisymmetric 3D surfaces

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) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、旋削加工による三次元曲面の輪郭精度を向上させる目的で、工作物の形状と所望の形状との補正法を提案した結果、十分な精度が得られた。開発したCNC旋盤で三次元曲面を加工した後、ラインレーザー変位センサを使用すると、十分な精度で切断することなく、ワーク上のワーク形状を測定できます。磁気研磨工程は、同じ加工プログラムを用いて旋削加工後に適用された。測定された仕上げ面は正確で滑らかなものを示した。表面粗さは、所望の表面粗さとして0.8ミクロンRa未満であった。これらの結果は、提案された機械加工および研磨方法が軸対称3D表面に対して十分に利用可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3DCADの普及により、複雑形状の非軸対称三次元形状の部品を高精度に設計することが可能になった。しかし、従来技術ではマシニングセンタ等を使用したミリング加工と研削加工で対応することは可能であったが生産性に問題があった。本研究では、これを解決するために、非円形加工技術と駆動形ロータリー工具の利用により、新しい工具レイアウト、専用CAM、専用機上計測システム、磁気研磨技術を総合的に駆使して、従来の加工時間の1/10以内に抑えた加工に成功した。これを開発するにいたる工作機械の仕様の提案、計測方法、制御方法は学術的に意義があり、研究成果の生産性向上は社会の製造技術に一石を投じた点で、大いに意義がある。

研究成果の概要(英文)：In the present study, for the purpose of improving the contour accuracy of a three-dimensional curved surface by turning process, the results obtained by the proposed compensation method between the profile of workpiece and the desired profile showed the enough accurate. After machining a three-dimensional curved surface by the developed CNC lathe, a line laser displacement sensor is available to measure the workpiece profile on the machine without taking it off with enough accuracy. The magnetic polishing process was applied after turning process with the same machining program. Its finished surface measured showed the precise and smooth one. The surface roughness were less than 0.8 micron Ra as the desired surface roughness. These results demonstrate that the proposed machining and polishing method are enough available for the axisymmetric 3D surfaces.

研究分野：機械工学

キーワード：工作機械 CNC旋盤 非円形加工 駆動形ロータリー工具 機上測定 磁気研磨

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中国、インドさらに東南アジア諸国の自動車の爆発的普及と、中東、アフリカ諸国の政情不安定により原油価格は上昇の一途をたどっている。このため省エネルギー化への対応として、我が国自動車産業は、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車の開発に注力している。中でもハイブリッド車を含めてほとんどの自動車、2輪車に用いられている内燃機関の省燃費化には、バルブリフト量とバルブ開閉タイミングの連続制御機構の採用によるエンジンの高効率化が有効である。しかし、現状は複雑なリンク機構が必用で、普及台数の多くを占める小型車、軽自動車、二輪車等の小排気量エンジンへの採用には至っていない。この問題を解決すべくスズキ㈱が小排気量エンジン向けに、可変リフト、可変バルブタイミング制御を可能とする回転軸を有する非軸対称三次元曲面をもつ 3D カムを開発した。これにより燃料消費量が 30%程度減少することから、他の自動車メーカーからも注目を浴びている。

2. 研究の目的

NACS-Turning の基礎となる「旋削による非円形加工方法」、「工作機械の加工制御方法」としてもが特許となり、「旋削加工による三次元曲面の創製」では、図 2 に示すように、これまでの旋削加工の概念を覆す工作物回転中心高さから垂直方向オフセットして駆動型ロータリ工具を配置し、三次元曲面を旋削加工することに成功している。さらに SKD11 焼入鋼(HRC61 以上)の NACS-Turning に成功した。これらの研究成果はいずれも非円形旋削加工に関連したもので、本研究テーマの基礎となっている。

この NACS-Turning には以下の解決すべき問題がある。

(1) NACS-Turning では、工具のすくい角および加工位置が工作物 1 回転中に大きく変化する。また工具芯高のオフセットにより工具-工作物間の干渉は回避できる場合が多いが、切込み動作の加速度が数十 G 以上、1000N を超える慣性力が発生する場合があります。工作物の加工精度のみならず工作機械自体にも悪影響を及ぼす恐れがある。

(2) 駆動型ロータリ工具を用いて、対象工作物 SKD や SCM 材(HRC60 以上)の高硬度材を加工するため、工具の振れ、機械剛性や工具の弾性変形により周期的な工作物形状誤差が発生する。

(3) 工作物仕上げ面表面粗さが $0.2\mu\text{mRa}$ 以下となる結果を得られていることから、研削工程を省略して研磨工程を実行できる可能性があり、独自の CAM システムによる切削工程と研磨工程を兼ねた工具経路生成、加工後の形状計測と指令値修正機能をもつ総合加工システムが必要となる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の項目について研究を行った。

- (1) タンデムテーブル型 5 軸同期制御 CNC 旋盤への改良
- (2) NACS-Turning 専用 CAM の開発
- (3) 工作物形状評価手法の開発
- (4) 専用ロータリ工具の切削特性の解析と刃先形状の開発
- (5) CNC 旋盤の性能評価
- (6) 修正指令値算出手法の検証
- (7) 主軸正転・逆転による工作物形状評価
- (8) 機上ポリッシングの実現と研磨効果の検証
- (9) NACS-Turning システムの応用と検証
- (10) 研究全体のまとめ

4. 研究成果

(1) 開発した CNC 旋盤の概要

図 1、表 1 に開発した CNC 旋盤の外観図と仕様を示す。X 軸にはリニアモータ駆動系を導入し、テーブルには軽量かつ高剛性な CFRP を採用することで高速な動作を実現した。テーブルに丸駒工具を主軸軸心高さからオフセットした位置に配置し、主軸に被削材を取り付けることで切り込みを行

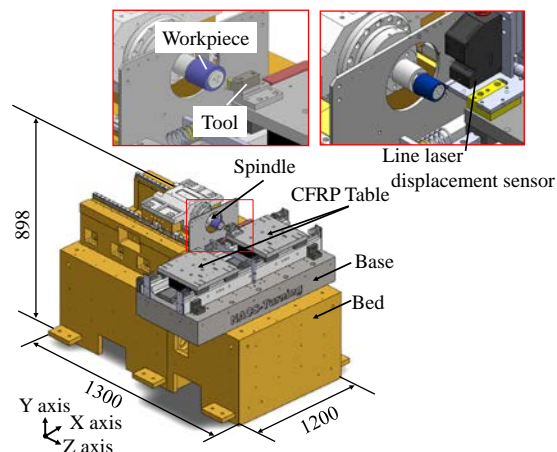


図 1 Schematic diagram of CNC lathe

う。テーブルは最高 133 m/s^2 の加速度で動作するため、主軸の回転角度に対して工具が追従動作を行うには十分な性能を有している。

(2) 対象とする加工形状

図 2 に対象とする加工形状を示す。加工形状は 3 次元カムを模擬的に表現したものであり、主軸への取り付けのために $\phi 25 \text{ mm}$ の貫通穴を設けている。外周部の基礎円径は $\phi 30 \text{ mm}$ としている。その基礎円部分に回転角度に依存して、回転中心からのリフト量に変化するよう 7 次関数曲線を適用し、長手方向に沿って勾配が一定の面をもつ形状として設計した。

(3) 形状測定手法

机上測定にて形状精度を測定し、補正するため、設計形状と加工点座標とを比較する。このため、加工後に NC 装置とレーザ変位計を同期させて形状を測定した。図 3 に測定システムを示す。測定後、レーザ変位計の座標データを PC で取得し、NC 装置からレーザ照射停止の指令を送ることで測定を行う。

(4) 実加工実験

加工実験は、繰返し制御を用いて、目標値と出力値の偏差を次回の制御入力に加えることを繰り返すことで誤差補償を行った。まず、繰返し制御を行った指令値を用いて実際に加工を行う。加工を行う際、切り込み方向にオフセット与えて設計形状より少し大きく加工する。次に、形状測定および指令値の修正は、工作物を主軸に取り付けた状態でラインレーザ変位計を用いて行う。このとき、測定値と指令値の比較し誤差を求め、指令値に補償する。

(4.)-1 誤差補償前加工

図 2 の加工点数は 10 万点程度である。ここでは、最もリフトが高くなる主軸 1 回転を抽出し、Z 軸位置における工作物までの距離を測定して図 4 に示す。図 5 に指令値と測定値との誤差を示す。この図は、基礎円直径に対して 5 mm のリフトを有する部分の 1 回転分を示す。図 5 より、誤差の値がマイナスになっている部分は過切削が起きており、プラスの値では切削不足が生じている。誤差の RMS (Root Mean Square : 平均二乗偏差) は $88.8 \mu\text{m}$ となり加工誤差は大きいことが分かる。この誤差を次の NC プログラムにより補償して加工を行う。

表 1 Specifications of CNC lathe

Items of specification		
Head stock	Stroke	200 mm
	Max acceleration	12.1 m/s^2
	Max spindle speed	10000 min^{-1}
Carriage	Stroke	90 mm
	Max acceleration	133 m/s^2
	Mass	13.5 kg
	Thrust force	1800 N
Encoder	Resolution	5 nm
	Sampling period	0.222 ms

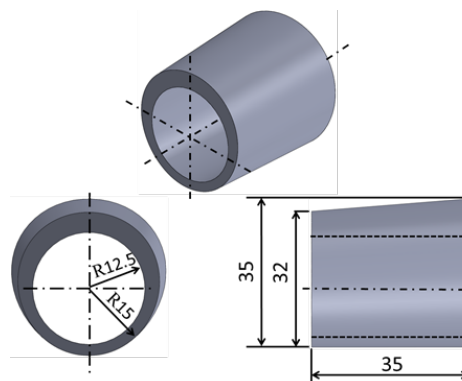


図 2 Target model

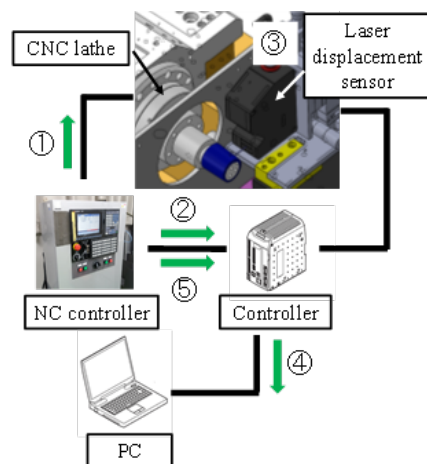


図 3 Measurement system

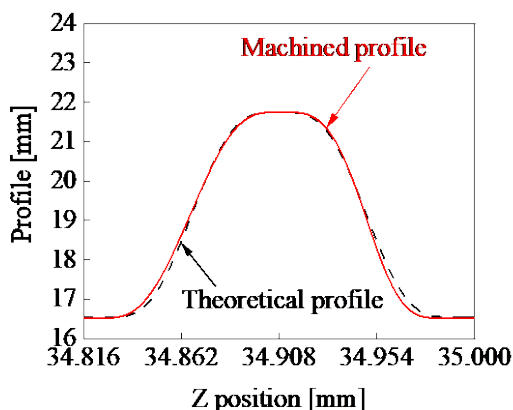


図 4 Theoretical profile and profile before compensation

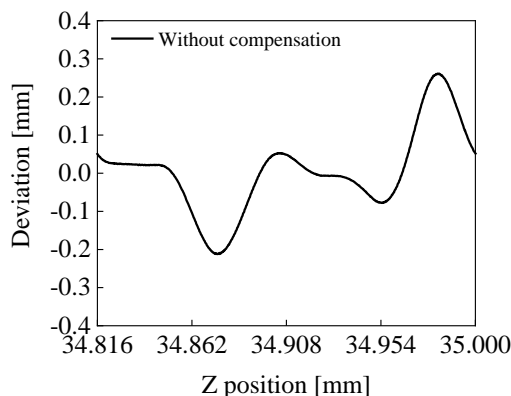


図 5 Deviation vs. rotation angle

(4)-2 誤差補償による加工形状評価

図 5 より、カーブの部分における誤差が修正加工前に比べて小さくなっていることが分かる。また、図より誤差は $Z=34.874 \text{ mm}$ 付近と $Z=34.981 \text{ mm}$ 付近のピークが小さくなっていることが分かる。また、修正加工前の RMS が $88.8 \mu\text{m}$ に対して修正加工後は $58.5 \mu\text{m}$ となり、誤差が約 34%減少した。したがって、修正加工の効果が確認できた。

(5) 正転、逆転を利用した加速度低減による加工法の適用

NACS-Turning は、ロータリ工具の円筒端面をすくい面として加工を行い、すくい角が常に変化する。この加工特性を実験的に明らかにする。また、工具オフセットの適用と正逆主軸回転方向に分割すると、非円形旋削時の切込み軸動作の著しい加速度低減効果を示す場合と逆に加速度増加効果を示す場合がある。そこで図 6 に示すように工具位置を工作物回転軸中心の左右に配置して、主軸正転、逆転の二工程に分割し、それぞれで加速度が低減する区間を加工領域として切削する。増大する区間はエアカット領域として緩やかに加速度が変化する経路に調整する。これにより、切込み動作の追従性の問題を解決する。さらに切込み動作軸を想定したタンデムテーブルを互いに逆方向動作させると、工作機械への振動伝達を著しく低減できることを確認している。

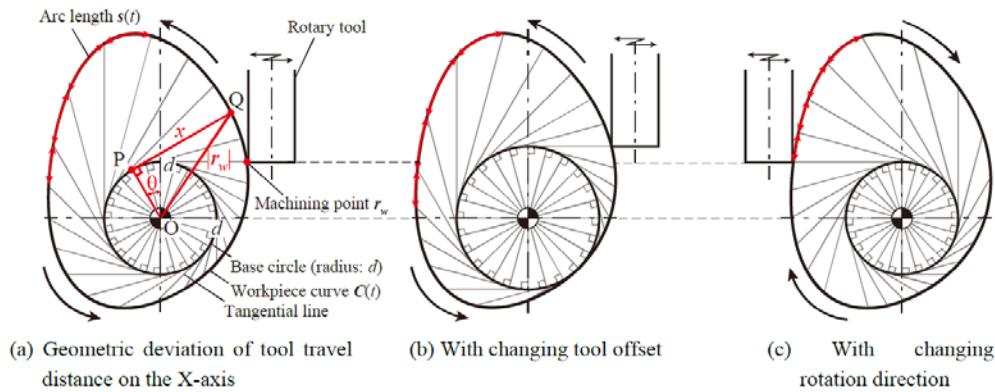
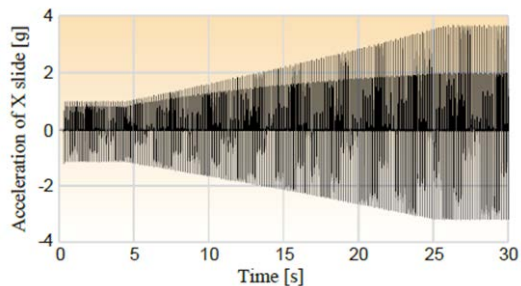
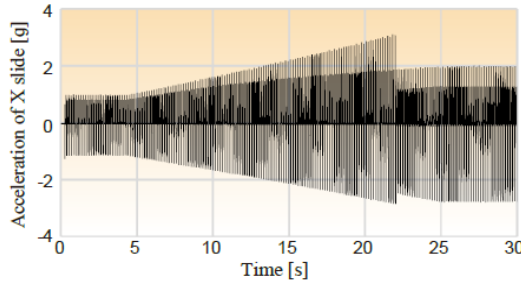


図 6 Acceleration reduction method



(a) Without air-cut (Original tool path)



(b) With air-cut (Proposed tool path)

図 7 Acceleration for the nominal tool path and tool path with air-cuts

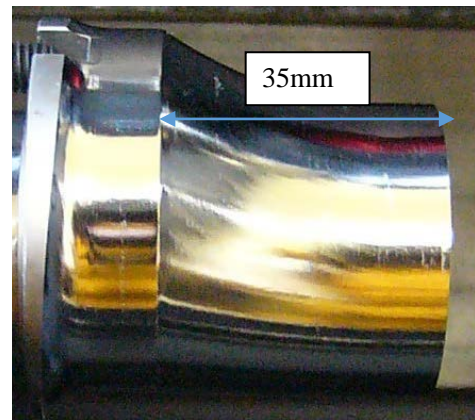


図 8 Machined workpiece (Hardened steel: Hrc61)

この効果を検証するために、正転・逆転のパスにて実際に加工を行った。このときの加速度測定結果を図 7 に示す、正転・逆転の効果により、著しく加速度が低減していることが確認でき、本研究の有効性が示された。

図 8 は、SKD11 材に焼入れ処理を施し、Hrc61 程度の硬度をもたせ、これを NACS-Turning により加工を行ったものである。焼入れ鋼にもかかわらず、約 40 秒程度で旋削加工が実現できた。これにより、本研究の実用化は十分可能であることが明らかとなった。

(6) まとめ

本研究では開発したリニアモータ駆動 CNC 旋盤と駆動形ロータリ工具を用いて、焼入れ鋼の非軸対称 3 次元曲面の旋削加工を実現し、従来のミリング加工や研削加工と比較して 90%以上の画期的な生産性向上成果を得た。これにより、新しい内燃機関のカム部品を始め、非円形形状の加工にイノベーションをもたらすことができる。

今後の課題としては、駆動形ロータリ工具のアライメント設定、回転角度位置の同期精度が挙げられる。

<引用文献>

- ① 神田倫之, 森重功一: 工具干渉と構造干渉を考慮した 5 軸制御加工用工具経路生成法, 精密工学会誌, Vol.81, No.10, 2015, pp.969-973.
- ② 山本雅博, 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.
- ③ 上原侑也, 本江勇介, 閻紀旺: 砥石断面形状の機上計測および補正による自由曲面の超精密研削加工, 2016年度精密工学会春季大会, 2016, pp.231-232.
- ④ 森本喜隆: 旋削による非円形加工方法, 特許第 5413913 号, 2013.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ①森本喜隆, 高杉圭吾他, 高速動作を可能とするリニアモータ駆動型対向テーブルを搭載した CNC 旋盤の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 832, 2015, p. 15-00290
- ②Naohiko Suzuki, Yoshitaka Morimoto, Keigo Takasugi, Development of Desktop Machine Tool with Pipe Frame Structure, International Journal of Automation Technology, Vol.9, No.6, 2015, pp. 720-730
- ③曲面パラメータに基づいた高精度高効率工具経路生成-一般曲線への適用-
- ④Kyosuke Kawagishi, Shoma Umetani, Ken Tanaka, Eiji Ametani, Yoshitaka Morimoto, Keigo Takasugi, Development of FOUR-AXIS 3D Printer with Fused Deposition Modeling Technology, International Journal of Automation Technology, Vol.11, No.2, 2017, pp.278-286
- ⑤高杉敬吾, 森本喜隆, 浅川直紀, 曲面パラメータを用いた追加/修正可能な加工経路生成法の開発, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 5, 2018, pp. 468 - 472
- ⑥高杉敬吾, 森本喜隆, 浅川直紀, Improvement of machining accuracy for 3D surface machining with CNC lathe, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 12 , No. 4, 2018, pp. 1 - 14
- ⑦森本喜隆他, 実時間動特性同定に基づく NC 移動テーブルの高精度位置決めに関する研究精密工学会誌, Vol. 85, No. 1, 2019, pp. 113 - 118
- ⑧鈴木直彦, 森本喜隆他, パイプフレーム構造 CNC 旋盤の開発, Vol. 85, No. 2, 2019, pp. 189 - 196

[学会発表] (計 8 件)

- ①長谷川 陽, 森本 喜隆, 高杉 敬吾, タンデムテーブル型 4 軸同期制御 CNC 旋盤の開発-移動テーブルの動的特性評価と振動抑制効果が実加工に及ぼす影響の考察-, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2015), pp.269-270.
- ② Yoshitaka Morimoto, Keigo Takasugi , Development of a tandem-table-type CNC lathe with four-axis synchronized control, International Symposium on Flexible Automation (ISFA), 2016.
- ③ Yoshitaka Morimoto, Greenslet Hitomi Yamaguchi, Magnetic abrasive finishing of non-axisymmetric curved surfaces using rotating magnetic tool, International Symposium on Flexible Automation (ISFA), 2016.
- ④ Yoshitaka Morimoto, Honoka Yamada, Vibration Control of Computer Numerically Controlled Lathe With CFRP Pipe Frame, ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing, 2017.
- ⑤ 森太一, 森本喜隆, 林晃生他, タンデムテーブル型 4 軸同期 CNC 旋盤の開発-工作物の形状測定-, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 2017.
- ⑥ Taichi Mori , Yoshitaka Morimoto , Akio Hayashi , Study On Turning Of Non-Axisymmetric Three-Dimensional Curved Surfaces, Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME, 2017.
- ⑦ Satoshi IINO, Serenn SATO, Yoshitaka MORIMOTO , Development and performance evaluation of desktop machine tool, EUSPEN 17th International Conference & Exhibition poster session, 2016, pp.77-78.
- ⑧ Tatsuya Mukai, Yoshitaka Morimoto, Akio Hayashi, A Study on Improvement of Reversing motion by Frictional Force Compensation of an NC Moving Table, Proceedings of International Conference on Precision Engineering, 2018.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 工作機械

発明者: 森本喜隆, 鈴木直彦

権利者: 学校法人金沢工業大学, 高松機械工業株式会社

種類: B23 工作機械等, G05 制御、調整

番号: 特許第 5786226 号

取得年：2016年6月15日
国内外の別：国内

名称：工作機械の加工制御方法
発明者：森本喜隆，中垣勝敬
権利者：学校法人金沢工業大学，高松機械工業株式会社
種類：B23 工作機械等，G05 制御、調整
番号：特許第 5936178 号
取得年：2016年6月15日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

https://www.kanazawa-it.ac.jp/kitnews/2019/0107_morimoto.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：浅川 直紀
ローマ字氏名：ASAKAWA Naoki
所属研究機関名：金沢大学
部局名：機械工学系
職名：教授
研究者番号（8桁）：50231874

研究分担者氏名：林 晃生
ローマ字氏名：HATASHI Akio
所属研究機関名：金沢工業大学
部局名：機械工学科
職名：講師
研究者番号（8桁）：50734430

研究分担者氏名：高杉 敬
ローマ字氏名：TAKASUGI Keigo
所属研究機関名：金沢大学
部局名：機械工学系
職名：助教
研究者番号（8桁）：80710235

研究分担者氏名：加藤 秀治
ローマ字氏名：KATO Hideharu
所属研究機関名：金沢工業大学
部局名：機械工学科
職名：教授
研究者番号（8桁）：90278101

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：GREENSLET Hitomi Yamaguchi
ローマ字氏名：GREENSLET Hitomi Yamaguchi