

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03892

研究課題名(和文) オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発

研究課題名(英文) Development of an On-machine Polishing CAM System Based on Five-axis Control

研究代表者

藤尾 三紀夫 (Fujio, Mikio)

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授

研究者番号：70238541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、バリ取り用のセラミックファイバーブラシを用い、オンマシンでの磨き加工を自動化する「オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステム」の開発を目的としている。磨き加工の工具経路を3DCADのAPIを用いて生成し、アルミの凸型円弧面・球面、凹型円弧面・球面および凹凸円弧面を対象に加工実験を行った。その結果、ブラシを5軸制御することで磨き加工が可能であることが明らかになった。しかし、凹凸による切り込み量の制御、主軸回転数、送り速度などにばらつきが多く生じ、安定した磨き加工条件の選定まで至らなかった。また、PCD工具や機上ポリッシングツールの適用実験まで至らず今後の課題として残った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見により、セラミックファイバーブラシを加工対象表面の法線ベクトル方向に5軸制御することで、加工表面の磨き加工が可能であることが示された。また、汎用の3DCAD(Rhinoceros)のAPIを用いることで、5軸制御の工具経路が生成可能であることを確認した。セラミックファイバーブラシのブラシ径の種類を増やし、さまざまな形状や材料を対象に磨き加工の最適な条件を見つめることで、ある程度の実用化が可能であると考えられる。結果として、これらの加工条件の選出やPCD工具、機上ポリッシングツールとの併用により、より実用的な磨き加工自動化の可能性を示す事ができた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop “An on-machine Polishing CAM System Based on Five-axis Control” that can automate on-machine polishing using ceramics fiber brush for deburring. The tool paths for the polishing process were generated using the API of a 3D CAD Rhinoceros. And machining experiments were performed on convex arc surfaces, spherical surfaces, concave arc surfaces, and uneven arc surfaces of aluminum. As a result, it became clear that polishing can be achieved by controlling the brush with 5-axes. However, there were many variations in the control of the cutting depth due to unevenness, the rotation speed of the spindle, the feed rate, and it was not possible to select stable polishing conditions. Additionally, the application experiments with PCD tools and on-machine polishing tools were not conducted, and it remains as future tasks.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：磨き加工用CAM セラミックファイバーブラシ 表面粗さ 5軸制御 凹凸面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

車体用プレス金型加工などの部品加工において、切削加工後の磨き加工は工程時間全体の 15 ~ 20% を占めており、磨き加工の自動化によるコストの低減、納期の短縮、品質の安定・向上が望まれている[1]。また磨き加工は職人の技能に依存し、職人の高齢化による人材不足も懸念されている。このためロボットが利用されているがティーチング操作や専用機器が必要であり、パスの生成に汎用性がなく、磨きの自動化に十分に活用できていない[2]。

一方、砥粒加工技術の進歩により、工作機械の主軸に取り付けて汎用工具と同様にオンマシンで磨き加工が可能な工具や手法が数社から市販され、自由曲面の磨き加工を自動化できる環境が整ってきた。図1に示すバリ取用のセラミックファイバーブラシ(ファイバーブラシ)、ラバーバンド砥石やダイヤモンド砥石を用いた機上ポリッシングツール、および多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)工具がその代表例である。



ラバーバンド砥石やダイヤモンド砥石を用いた機上ポリッシングツール、および多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)工具がその代表例である。

CAD/CAMシステムが高度化した現在、CADデータを活用してこれらの工具を用い、磨き条件に合わせた工具経路を生成することで、磨き加工自動化の実現可能性が出てきた。

2. 研究の目的

CAD/CAMシステムの高度化やオンマシン磨き加工用工具の市販化、そして5軸制御の工作機械導入により、磨き加工の自動化の可能性が示されるようになってきた。そこで本研究ではこれら数種の磨き加工用工具を適切に使い分け、バリ取り工具を加工面に垂直に制御することで磨き加工を自動化する「オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発」による自由曲面磨き加工自動化の実現可能性の検証を目的としている。

3. 研究の方法

(1) オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステム

提案するCAMシステムでは、図2に示すように曲面の曲率に応じた磨き工具に基づいて加工部位を選択して工具経路を生成する。同時に、オンマシンで磨き加工が可能な工具は材質や形、用途に併せて送り速度や主軸回転数などの付加条件を付加する。5軸制御工作機械では、工具経路に基づいて、切削工具と同様にATCに格納されている磨き加工用工具を選択して自由曲面の磨き加工をオンマシンで行う。本研究では3次元CADであるRhinocerosのPythonScript[3]を用いてCLデータを生成し、ポスト処理[4]によりNCプログラムに変換し工作機械を5軸制御している。

(2) セラミックファイバーブラシと磨き加工方法

オンマシンでの磨き加工実験で使用したセラミックファイバーブラシは、図3(a)に示すようにブラシ径15[mm]のアルミ加工用で中央領域は空洞となっている。面を磨く際には、図3(b)に示すように、5軸制御により、ファイバーブラシを研磨面の法線ベクトルの方向に傾けることにより、平面だけでなく凹凸曲面も研磨できる。この工具位置と法線ベクトルはCADのスクリプトにより計算する。また切り込み方向は、凸面では-Z方向、凹面では+Z方向となる。

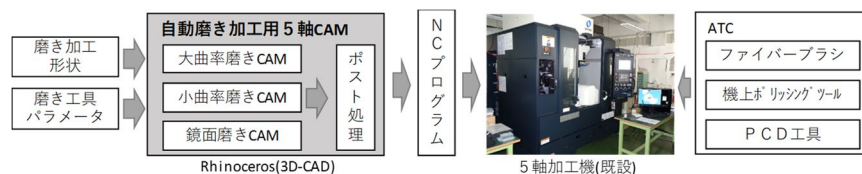
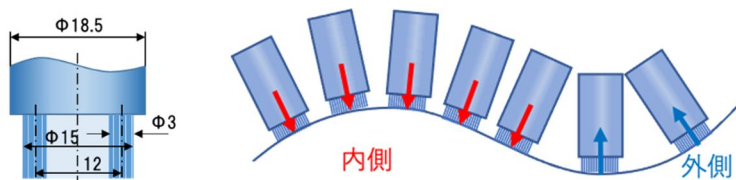


図2 提案するオンマシン磨き加工用5軸CAMシステム



(a) ブラシ形状 (b) 凹凸面での磨き加工と切り込み方向
図3 ブラシを用いた凹凸面の磨き加工手法

示すように、5軸制御により、ファイバーブラシを研磨面の法線ベクトルの方向に傾けることにより、平面だけでなく凹凸曲面も研磨できる。この工具位置と法線ベクトルはCADのスクリプトにより計算する。また切り込み方向は、凸面では-Z方向、凹面では+Z方向となる。

4. 研究成果

(1) 3軸と5軸制御における磨き加工結果の比較

凸型球面加工を対象に、切り込み 0.5[mm]で3軸制御と5軸制御することにより等高線パスで磨き加工を行い、加工後の幾何形状の比較を行った。加工条件は送り速度 1200[mm/min]、主軸回転数 4800[rpm]で50回磨いた。図4(a)は磨き加工前の基準面であり、図4(b)は3軸制御、図4(c)は5軸制御で磨き加工を行った結果である。図5は、球断面形状を示しており、5軸制御では維持されている幾何形状が、3軸制御の場合は磨き過ぎが生じて幾何形状を維持できないことが明らかになった。凸型円弧面での実験の結果においても同様に3軸では形状の劣化が認められた[5]。

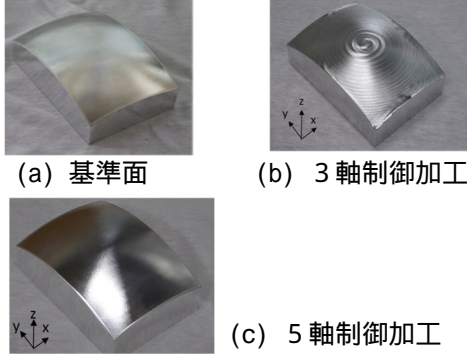


図4 等高線3軸加工と5軸加工の結果

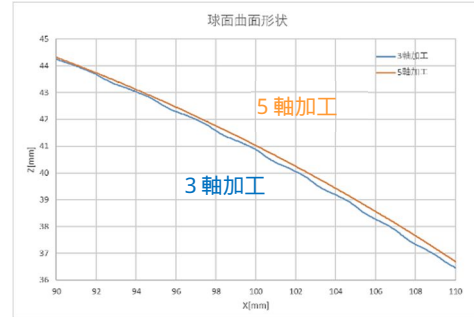


図5 断面幾何形状の比較

(2) 凸型球面加工における磨き加工結果

提案する手法で凸型球面について磨き加工が可能かについて R120[mm]の凸型球面加工を対象に検証を行った。磨き加工ワークとして図6(a)に示す加工パスにより Y 軸方向にカブス高さ 5[μm]になるように 10[mm]のボールエンドミルで R120[mm]の球面加工を行った面を基準面とした。磨き加工では図6(b)(c)のようにピークフィード (pf) 1.5[mm]の等高線および走査線工具経路で磨き加工を行った。図7(a)は加工後の基準面、図7(b)は等高線加工後、図7(c)は走査線磨き加工後の形状を示しており、磨き加工が可能であることを確認した。磨き条件として切り込み 0.2[mm]、磨き回数 30 回、主軸回転数 2400[rpm]、送り速度 [1200mm/min]で加工を行った。図8(a)は基準面、図8(b)は切り込み 0.5[mm]、主軸回転数 1200[rpm]で磨いた表面の顕微鏡の 100 倍写真である。加工前の表面粗さ Ra1.05[μm]は磨き加工により Ra0.13[μm]となり、磨き加工により表面のカブス高さが取り除かれていることがわかる。また等高線での磨き加工において、切り込み量増、磨き回数増ほどよく磨け、主軸回転数は低い 1600[rpm]程度が良いことが明らかになった。

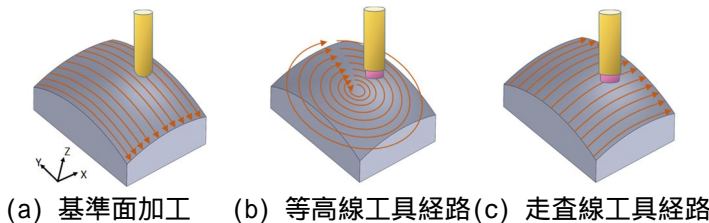
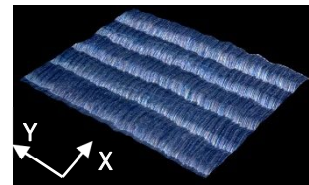


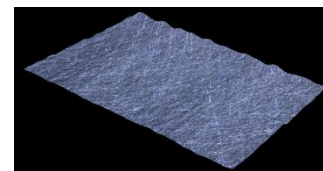
図6 凸型球面加工用工具経路



(a) 基準面の表面性状



(a) 基準面 (b) 等高線加工後 (c) 走査線加工後
図7 凸型球面加工後の形状



(b) S1200rpmでの表面性状
図8 表面性状の顕微鏡計測

(3) 凹型球面加工における磨き加工結果

凹型球面磨き加工実験を行うため、図9(a)に示すボールエンドミルで走査線工具経路を用いて R120[mm]の半球面をカブス高さ 5[μm]になるように加工を行い基準面とした。そして図9(b)(c)に示す等高線および走査線工具経路を用いて球面の磨き加工を行った。磨き加工用に用いたブラシは 15[mm]で、ピックフィード 1.5[mm]で作成し、磨き検証実験を行った。図10はそれぞれの工具経路を用いて磨き加工を行った結果を示しており、磨き加工ができていることがわかる。図11は、磨き回数 30 回で切込量を 0.2[mm]とした場合の凹型および凸型球面での工具経路による磨きの効果を示している。同図より走査線工具経路では磨きに差が無いが、等高線工具経路では凸型球面に比べ凹型球面の方が良く磨けていることがわかる。これは凹凸面における切り込み量の差を反映している。凹型円弧面での磨き加工実験において、切り込み量 ZERO

で磨き加工が実現でき、切り込み量はZ軸プラス方向(凹面上側)にする必要がある事がわかった。また、凹面では少ない切り込み量で磨け、一般に磨き過ぎによる形状劣化が発生しやすいことが明らかになった[6]。

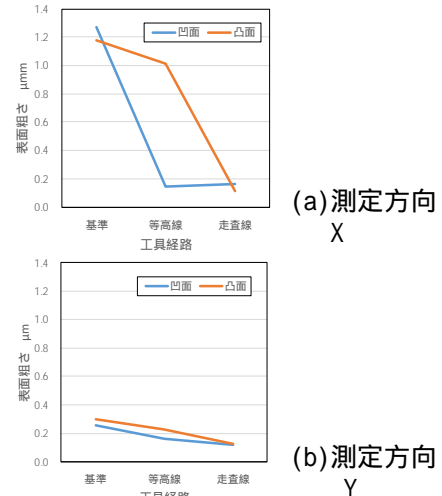
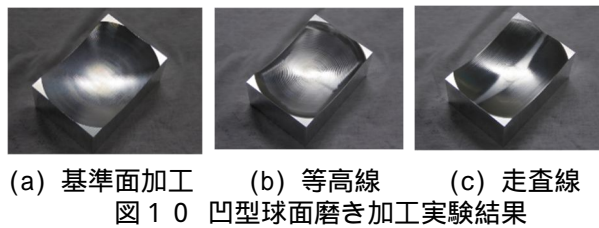
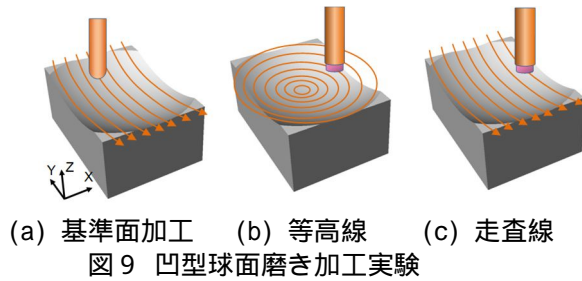
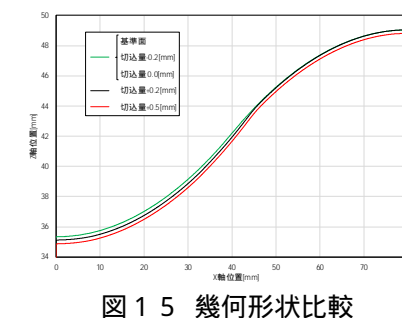
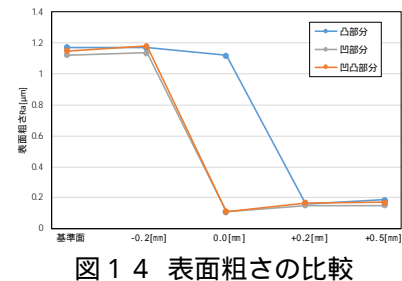
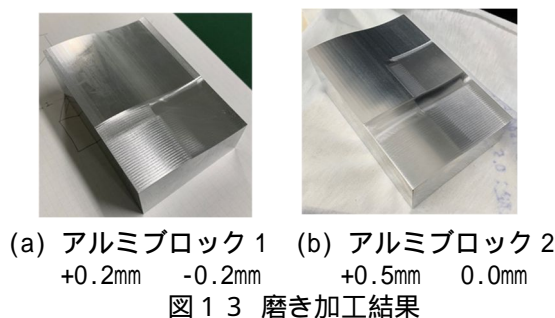
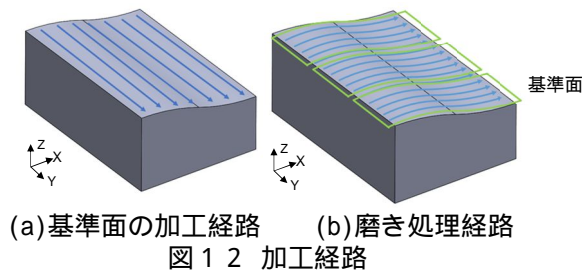


図11 工具経路と切込量の比較

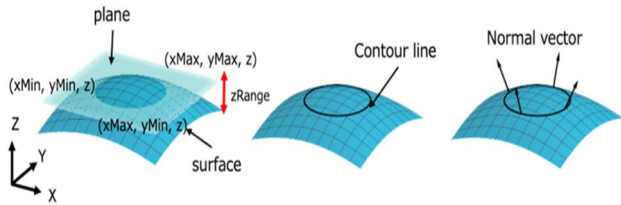
(4) 凹凸型連続円弧曲面での磨き加工結果

実用化に近い加工を対象とするため、凹凸円弧面が連続した形状を対象に加工実験を行った。磨き加工前の基準面として図12(a)に示すアルミブロックを、10のボールエンドミルで走査線工具経路を用いてR120の半球面をカスプ高さ5[μm]になるように加工を行い基準面とした。その後、図12(b)に示す走査線工具経路で凹凸型連続円弧面を対象に図12(b)の切り込み条件を変え、2つのアルミブロックについて磨き加工を行った。磨き加工用に用いたブラシは15[mm]で、各工具経路はpf 1.5[mm]のピッチで作成した。その他の加工条件は送り速度1200[mm/min]、主軸回転数2400[rpm]に設定し30回磨き加工を行った。図13(a)(b)は、切り込み量を変えた磨き後の形状を示している。図14は磨き加工後の表面粗さを示し、目標のRa0.2[μm]が得られているが、凸部では充分磨けていない箇所が生じていることがわかる。また図15はX軸方向の幾何形状を半径120[mm]と比較した図で、切り込み量+0.5[mm]の場合は凸面と凹面共に、基準面と比較すると幾何形状が劣化し、切り込み量+0.2[mm]の場合は凹面部分のみ幾何形状が劣化し、磨き加工による磨き過ぎが生じていることが確認された。

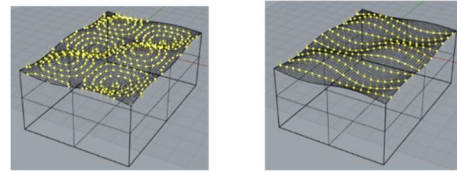


(5) オンマシン磨き加工用5軸CAMの工具経路生成手法

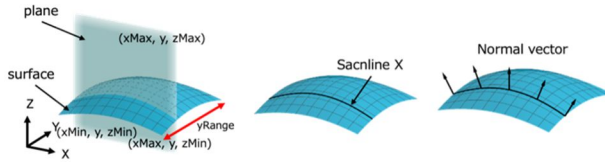
生成する工具経路は一般的な加工で用いられる走査線および等高線工具経路を対象とした。図16(a)は等高線工具経路生成手法を示しており、XY平面と幾何形状との交線を求め、指定されたピッチでの点群と、その点群の単位法線ベクトルを求め、対象形状の各Z高さのXY平面において生成することで、等高線工具経路を生成している。図16(b)は走査線工具経路の生成手法を示しており、等高線と同様にXZ平面と幾何形状との交線を求め工具経路を算出している。図17は凹凸型連続半球面に適応した等高線および走査線工具経路を示し、また加工シミュレーション結果を示しており、提案手法により工具経路生成が可能であることを確認した[7]。



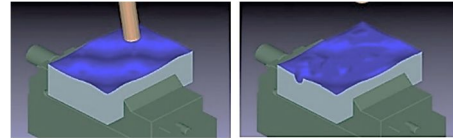
(a) 等高線工具経路生成手法



(a) 等高線工具経路 (b) 走査線 X



(b) 走査線工具経路生成手法



(c) 等高線工具経路 (d) 走査線 X

図 1 6 工具経路生成手法

図 1 7 工具経路生成結果

(6) まとめ

ファイバーブラシを5軸制御することでオンマシンでの磨き加工を実現するCAMシステムの開発を目標とし、凹凸型円弧面、凹凸型球面および凹凸型連続円弧面を対象に磨き加工実験を行った。ブラシにより磨き加工の可能性についてアルミ材を対象に凸形状の磨き加工について検証した結果、汎用的な金型の表面粗さである $Ra0.2[\mu m]$ で磨き加工が可能であることが確認できた。次に、凹凸型球面を有する曲面を対象に磨き加工実験を行った。その結果、凹凸状態により切り込み量や回転数を変える必要があり、切り込み量を適正にしないと幾何形状を変化させる可能性が示された。特に、凹面では切り込み量がZEROでも磨くことができ、切り込み方向を+Z方向(凹面から上方向)にする必要があり、ブラシ径との関係を考慮する必要がある。これより凹凸型連続円弧面において、凹凸面の切り込み量、そして凹凸切り替え部の切り込み量の変化が難しい事が実験結果からわかった。一方、3DCADであるRhincerosのAPIを用いて等高線工具経路と走査線工具経路を生成する手法を提案し、CAMで生成されたこれらの工具経路を用いて磨き加工が可能であることを確認した。

これまでの研究成果をまとめると、ブラシを用いたオンマシンでの磨き加工において、提案する手法により磨き加工が可能であることを確認した。しかし現状では、凹凸面における切り込み量の形状表面の変化に応じた適切な設定については絞り込むことが出来なかった。また、機上ポリッシングツールやPCD工具への適応についてまで十分な検証に至らなかった。今後は凹凸面が組み合わさった円弧面や球面、また凹凸で曲率の異なる異形状を対象に、機上ポリッシングツールや多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)を利用した磨き加工を適用し、システムの構築を進める必要がある。

<引用文献>

- [1]大寄越彦：現場で役立つ射出成型金型磨き加工の勘どころ，日刊工業新聞社，2011，pp.82
- [2]永田寅臣ほか：ボールエンド砥石のためのハイブリッド・モーション力制御法の開発とペットボトル金型磨きロボットへの適用実験，精密工学会誌，70-1(2004)，pp.59-64
- [3]三井和男：Rhinceros x Python コンピューショナルデザイン入門，彰国社，pp.50，2017
- [4]竹内芳美：多軸・複合加工用CAM，日刊工業新聞社，pp.41，2013
- [5]池上奈穂美，藤尾三紀夫：ファイバーブラシの5軸制御に基づく磨き加工用CAMシステムの開発 基礎実験について，2017年度精密工学会春季学術講演会，C66，2017
- [6]藤尾三紀夫：オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - ブラシを用いた凹凸曲面での磨き加工実験 - ，令和元年度 沼津高等専門学校研究報告(第54号)，pp.17-24，2020
- [7]櫻庭拓海，藤尾三紀夫：オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 凹凸円弧面の磨き加工について - ，2019年度精密工学会春季学術講演会，A17，2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 藤尾三紀夫	4. 巻 1
2. 論文標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - ブラシを用いた凹凸曲面での磨き加工実験 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 令和1年度 沼津工業高等専門学校研究報告（第54号）	6. 最初と最後の頁 17,24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 中野齊可太	4. 巻 1
2. 論文標題 CAM System for On-Machine Polishing Based on Five-Axis Control - Application Results for Convex and Concave Surface -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2019)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 櫻庭拓海, 藤尾三紀夫	4. 巻 -
2. 論文標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成30年度 沼津高等専門学校研究報告（第53号）	6. 最初と最後の頁 29,34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 中野齊可太	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of an On-machine Polishing CAM system Based on Five-Axis Control - Application Result to Convex Surface -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018)	6. 最初と最後の頁 87-93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 知久奏斗, 藤尾三紀夫
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 凹凸曲面での磨き加工 -
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 (ROBOMECH2021 in KANAZAWA)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 小川生能
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - ブラシを用いた凹型曲面での磨き加工実験結果 -
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 中野齊可太
2. 発表標題 CAM System for On-Machine Polishing Based on Five-Axis Control - Application Results for Convex and Concave Surface -
3. 学会等名 The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2019) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 知久奏斗, 藤尾三紀夫
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 凹凸曲面での磨き加工 -
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 (ROBOMECH2021 in KANAZAWA)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻庭拓海, 藤尾三紀夫
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 凹凸円弧面の磨き加工について -
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塩晃平, 櫻庭拓海, 藤尾三紀夫
2. 発表標題 オンマシン磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 磨き表面性状のブラシ径による違いについて -
3. 学会等名 第24回高専シンポジウム in Oyama
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 中野齊可太
2. 発表標題 Development of an On-machine Polishing CAM system Based on Five-Axis Control - Application Result to Convex Surface -
3. 学会等名 The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤尾三紀夫, 櫻庭拓海, 中野齊可太
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発 - 凹型球面での等高線と走査線の工具経路生成について -
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 櫻庭拓海, 藤尾三紀夫
2. 発表標題 オンマシン自動磨き加工用CAMシステムの開発 - 凹型曲面の磨き加工実験について -
3. 学会等名 第23回知能メカトロニクスワークショップ(IMEC2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関