

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：51201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03889

研究課題名(和文)超音波ミーリングによる3次元形状曲面への規則的微細テクスチャの創成

研究課題名(英文)Create micro patterned texture on three dimensional curved surface by ultrasonic milling

研究代表者

原 圭祐 (Hara, Keisuke)

一関工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：30515812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、球面などの立体形状に対し特殊な切削加工法で細かな周期的な凹凸(テクスチャ)を高速に創成し、摩擦・摩耗を現象させる技術について研究した。まず、テクスチャを創成する加工機の構築および加工試験を実施した。試験の結果、凹球面へ理論通りのテクスチャが創成できることを確認した。また、創成したテクスチャが摩擦減少に効果があるのかを確認するための摩擦試験機を設計、製作した。今後は、より成果を社会に還元すべく、摩擦を減少させるテクスチャの最適化手法について研究を行いたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、高硬度、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性に優れた機能性材料が開発されている。それらの材料は、過酷な環境下で使用される摺動部を持つ機械類、人工股関節など医療製品への活用が期待されている。これらの摺動部を有する製品は、その動作を滑らかにすること、長寿命化や信頼性向上のため、耐摩耗性の向上、摩擦抵抗の減少が強く望まれる。現在、脱炭素社会実現のため省エネにつながる摩擦低減技術が重要になる。本研究課題の成果は、曲面へのテクスチャ加工により、これらの問題を解決できる糸口を見出したと考える。

研究成果の概要(英文)：This research theme focused to fabricating technique periodical dimple (called "texture") by milling on the finished surface. First, I fabricated a texturing machine tool and texturing experiments by the machine were performed. It was confirmed that the developed texturing technique can perform periodical texturing on concave spherical surface. In addition, I designed and fabricated a tribological experiments instrument for evaluate tribological properties of 3D form surface. In future works that I'll conduct optimization research of texture properties to reduce friction of various machines to realize energy save and carbon neutral society.

研究分野：機械加工・機械要素

キーワード：トライボロジー テクスチャ加工 超音波ミーリング

1. 研究開始当初の背景

近年、特殊ステンレス、コバルト合金など高硬度、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性など様々な特性に優れた機能性材料が開発されている。それらの材料は、過酷な環境下で使用される電磁弁などの摺動部を有する工業製品、人工股関節など医療製品への活用が期待されている。これらの摺動部を有する製品は、その動作を滑らかにすること、長寿命化や信頼性向上のため、耐摩耗性の向上、摩擦抵抗の減少が強く望まれる。近年、摺動面へ「きさげ面」の様に、マイクロメートルレベルの微細凹凸(微細テクスチャと呼ぶ)を設けることで、接触面積の減少、油溜り構成により摩擦抵抗が減少すると知られ、微細テクスチャを付ける加工技術について盛んに研究されるようになってきている。例えば、ファストツールサーボを用いた加工、複合加工機によるターンミル加工による方法などである。しかし、これらは「加工面は円筒面に限られ」、「テクスチャを設けるためだけの加工」であり、形状仕上げ加工の後に別工程で行われ、加工効率の観点からも満足でき無い。

2. 研究の目的

本研究課題では、超音波ミーリング加工による、3次元形状の微細テクスチャ加工技術を提案、3次元形状微細テクスチャ加工を行うための加工機を開発する。申請者は先に科学研究補助金(課題番号 15K17954)の採択を受け、旋盤加工での規則テクスチャ創成について研究を行っており、ほぼ通常の旋盤加工と同様の加工で規則的微細テクスチャを短時間で創出することに成功している。また、得られた微細テクスチャにより摩擦抵抗が減少し、その経時変動も少ない摺動面となることを確認している。今回は、本技術の適用先を広げ、微細テクスチャを3次元形状に創成し、人工股関節や金型部品などへの適用を目指す。

3. 研究の方法

図 3-1 に超音波旋削による微細テクスチャ創成の原理を示す。規則的に超音波振動する工具と加工物の送り運動により、規則的な微細テクスチャが加工面に転写される。図 3-2 に超音波ミーリングにおける微細テクスチャ加工原理を示す。ボールエンドミルなどの回転工具が軸方向に振動された状態で切削することにより、加工面形状を得ると同時に、軸方向に超音波振動された工具の刃先が通った軌跡状痕が加工面に転写される。この状痕のピッチ p は、以下の式(1)で理論的に導出できる。

$$p = 2\pi r N \times 10^3 / (60f) [\mu\text{m}] \quad (1)$$

r : 工具刃先の回転半径 mm,
 N : 主軸回転速度 min^{-1} ,
 f : 超音波振動周波数 Hz

ただし、式(1)は工具の切れ刃数を1枚と仮定している。このほかにも、工具の送りピッチ、切れ刃の数によってもテクスチャ形状に変化が出るほか、加工面の形状によりボールエンドミルの刃先が加工物に接触する位置が変わるため、回転半径 r が変化しテクスチャに変化が生じるため、これらを考慮した条件を設定するシステムを構築する。加工機は、3軸の位置決め装置と超音波スピンドルから構成された卓上の NC 超音波フライス盤である。送り機構は市販の直動位置決め機構を3軸分用いて、モータドライバを介してワークステーションで制御する。超音波スピンドルは、市販のものを搭載した。加工プログラムは、CAMソフトによりパスを生成しポスト処理を行ったものを用いる。

4. 研究成果

図 4-1 に本研究で製作した「超音波ミーリング加工機」を示す。本加工機は、エンドミルなどの回転工具を回転運動させながら軸方向に超音波振動させる「超音波スピンドル」を搭載した卓上横型 NC フライス盤形態の機械である。3軸の直動機構を有し、ステッピングモータとモーシ

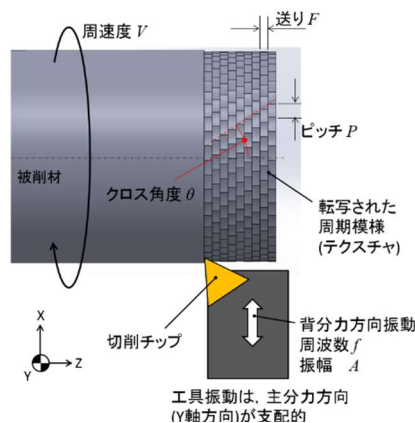


図 3-1 超音波旋削によるテクスチャ加工の概要

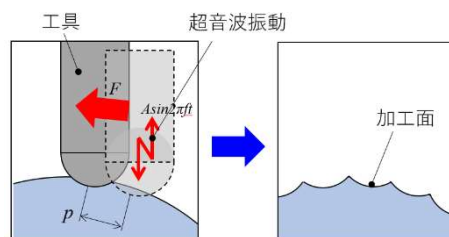


図 3-2 超音波ミーリングによる規則テクスチャ創出の原理

ョンコントロールボードで位置決め制御される仕組みとした。

構築した加工機を用いて、曲面形状のテクスチャリング加工試験を実施した。加工条件を表4-1に、図4-2(a)に、本研究で試験に供する試験片形状を示す。また、Fusion360によりCAMポスト操作を行い、加工プログラムを出力した。生成した加工パスの例を図4-2(b)に示す。試験片はアルミニウム合金A2017とし、SR7 mmの凸・凹球面を組み合わせた形状である。なお、下加工をスクエアエンドミルで行った後、2枚刃のボールエンドミルで曲面形状のテクスチャ加工を行った。テクスチャ加工時のツールパスは、渦巻き状のスキヤロップパスとし、ダウンカット設定としている。なお、工具の超音波振動は、事前にレーザドップラ振動計で計測し、 $1\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ となるよう設定した。

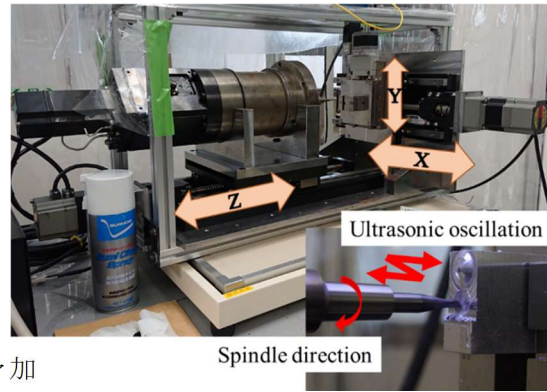
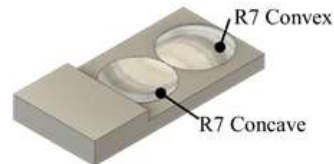


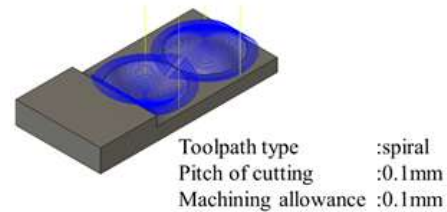
図4-1 構築した超音波ミーリング加工機

表4-1 テクスチャ加工条件

Workpiece material	A2017
Cutting tool	NS Tool MSB230 R1
Ultrasonic vibration	60 kHz / $1.0\mu\text{m}_{\text{p-p}}$
Rotational speed	1700, 3400, 4250, 8500min^{-1}
Feed rate	30 mm/min
Depth of cut	0.1 mm
Cutting direction	Down cut
Cutting fluid	Dry



(a) 試験片形状



(b) 加工パス

図4-2 テクスチャ加工試験片

表4-2に、超音波ミーリングによるテクスチャ加工試験を行った試験片の光学顕微鏡観察像とテクスチャの理論値 p_{th} および実測値 p_{ex} を示す。試験片は、(a) 超音波振動なしおよび (b-1)~(b-4) 超音波振動ありのものである。なお、傾斜角度 θ の面に対し超音波切削を行ったときの工具接触点の周速度 V およびテクスチャピッチの理論値 p_{th} は次の(2)式で表される。

$$V = 2\pi r N \sin\theta \quad [\text{mm}/\text{min}] \quad (2)$$

$$p_{\text{th}} = V/60fZ = 2\pi r N \sin\theta / (60fZ) = \pi r N \sin\theta / 30fZ \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

ここで、 r : 工具R [mm], N : 回転速度 [min^{-1}], f : 超音波振動周波数 [Hz], Z : 工具刃数

表4-2 テクスチャ加工面の光学顕微鏡像とテクスチャの理論値・実測値(傾斜角 $\theta=20\text{deg.}$)

US vibration	(a) w/o US	(b) with US			
Tool rotation	1700min^{-1}	(b-1) 1700min^{-1}	(b-2) 3400min^{-1}	(b-3) 4250min^{-1}	(b-4) 8500min^{-1}
Microscope image					
Theoretical Pitch p_{th}	-	$1.05\mu\text{m}$	$2.01\mu\text{m}$	$3.01\mu\text{m}$	$5.58\mu\text{m}$
Experimental Pitch p_{ex}	-	$1.10\mu\text{m}$	$2.03\mu\text{m}$	$2.89\mu\text{m}$	$5.72\mu\text{m}$

以上の理論式は、送り速度 F は工具の回転周速度 V よりも十分遅いため、その影響を考慮せずに求めている。これより、曲面の創成されるテクスチャのピッチは、切削速度 V 、すなわち回転速度 N と工具の接触角度 θ に依存することがわかる。そのため、超音波ありの切削では回転速度 N を変えて実験を行い、テクスチャピッチの変化の確認と理論値との比較を行った。

なお、テクスチャ加工面に創成されたテクスチャは、レーザ顕微鏡(Keyence VK-9700)を用いその断面曲線を抽出し、そこから凹凸間隔を複数求め、その平均値よりピッチ間隔 p_{ex} を求めた。

超音波有無でそれぞれ切削実験を行い、加工面の観察を行った。表 4-2 の(a)と(b-1)で比較した結果、超音波あり(b-1)では、切削痕中に周期的な模様が存在を認めたが、超音波なしの切削痕には見られなかった。また、工具回転速度を変えて切削した結果、周期模様の間隔が変化することを確認した。レーザ顕微鏡で加工面のテクスチャを計測、凹凸間隔の平均値 p_{ex} とテクスチャの理論値 p_{th} を比較した。その結果、実測値と理論値の誤差は 5%以内であることを確認した。これにより、提案手法による 3 次元局面へのテクスチャリングが可能であることが実験的に確認できたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Hara Keisuke, Fukuda Toshihiro, Taguchi Kyosuke, Isobe Hiromi, National Institute of Technology, Ichinoseki College Takanashi, Hagisho, Ichinoseki, Iwate 021-8511, Japan, National Institute of Technology, Hachinohe College, Hachinohe, Japan, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan	4. 巻 16
2. 論文標題 Surface Texturing Technique Based on Ultrasonic Turning for Improving Tribological Properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 78 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2022.p0078	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Keisuke Hara, Kyosuke Taguchi and Hiromi Isobe
2. 発表標題 A study on ultrasonic milling properties of cobalt alloy - Effects on burr generating suppression -
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Hara, Toshihiro Fukuda, Rei Ishizawa, Kyosuke Taguchi and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Surface Texturing Technique by Ultrasonic Turning to Produce Low Friction Surface for Various Materials
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Ozawa, Keisuke Hara and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Development of 3D friction measuring instrument for evaluate curved surface tribology characteristics
3. 学会等名 6th STI-Gigaku 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原 圭祐, 田口恭輔, 磯部浩巳
2. 発表標題 摺動摩擦の減少を目的とした超音波切削による規則テクスチャ面の創成
3. 学会等名 2021年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Ozawa, Keisuke Hara and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Development of a Novel Tribological Properties Evaluate Device for Curved Surface
3. 学会等名 5th STI-Gigaku 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原 圭祐, 磯部浩巳
2. 発表標題 超音波切削による機能性テクスチャ面の高速創成加工(第1報) - ステンレス鋼, チタン合金の規則テクスチャ加工 -
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koshi Nishikawa, Keisuke Hara and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Ultrasonic Turned Micro Texturing Technique to Reduce Friction Force
3. 学会等名 The 4th International Conference on "Science of Technology Innovation" 2019 (4th STI-Gigaku 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 圭祐, 磯部浩巳
2. 発表標題 超音波切削による微細テクスチャ面の摺動特性改善
3. 学会等名 第10回横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Hara, Toshihiro Fukuda and Hiromi Isobe
2. 発表標題 High speed ultrasonic turning for titanium alloy to improve processing efficiency and products quality
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田英勲, 原 圭祐, 磯部浩巳
2. 発表標題 高速超音波切削によるチタン合金の高効率・高品質加工の実現
3. 学会等名 2018年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Hara, Kyosuke Taguchi and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Investigation of tribological properties on ultrasonic turned surfaces
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 原 圭 祐
2. 発表標題 超音波切削による加工品位の向上に関する研究
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2019, パネル展示)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 圭祐, 田口恭輔, 磯部浩己
2. 発表標題 超音波ミーリングによるコバルト合金のパリレス加工に関する研究
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田英勲, 原 圭祐, 田口恭輔, 磯部浩己
2. 発表標題 超音波振動援用高速切削に関する研究 (第8報) -小型超音波切削加工装置による難削材加工の実現-
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季学術講演会
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
---------	---------