

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13839

研究課題名（和文）ナノエッジ効果で光の回折限界分解能を超越する光学式3次元微細エッジ計測法への挑戦

研究課題名（英文）Development of an optical method for evaluation of three-dimensional tool edge form with a high resolution beyond the diffraction limit

研究代表者

清水 裕樹 (Shimizu, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70606384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：次世代精密切削工具の高精度刃先形状定量評価実現を目的として、集光レーザービーム（レーザープローブ）を利用した工具エッジ形状の非接触・高速評価技術の開発を試みた。高精度対物レンズを採用したレーザープローブ光学系を構築してその基礎特性を実験的に評価し、光の回折限界を超える高い測定分解能でのエッジ検出を実現した。また、レーザープローブでシングルポイントダイヤモンド工具刃先輪郭を走査して得られたプローブ出力から、刃先輪郭形状を高精度に評価できることを実験的に明らかにした。さらに、切れ刃稜丸みに沿ったレーザープローブ走査による切れ刃稜丸み径評価について原理検討及び実験的検討を試み、その実現可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For the quantitative evaluation of edge forms of next-generation high-precision cutting tools, a measurement method, in which a focused laser beam referred to as the micro-laser probe is employed to realize non-contact and high-speed tool edge evaluations, has been developed. A prototype optical setup with a high-precision objective lens for the micro-laser probe has been developed, and its basic characteristics have been evaluated in experiments. The experimental results have demonstrated that the developed micro-laser probe has a high measurement resolution beyond the diffraction limit for tool edge measurement. It has also been verified that the developed micro-laser probe can be applied for the quantitative evaluation of a tool edge contour. Furthermore, a feasibility of the micro-laser probe for evaluation of a tool cutting edge radius has also been verified throughout theoretical and experimental investigations.

研究分野：精密工学

キーワード：精密計測 機械工学 生産工学 加工計測 精密位置決め

1. 研究開始当初の背景

(1)サブマイクロ・ナノレベル微細加工に用いられる工具においては、その刃先エッジ形状に対する要求が高まっている。例えばシングルポイントダイヤモンド切削工具では、切れ刃稜丸み径 100 nm 以下の精度が要求される。従来、これらの形状評価には電子顕微鏡 (SEM) が用いられてきたが、真空環境が必要で、測定に多大な時間を要していた。また、電子線による工具へのダメージや汚染物質付着がネックとなる。そのため、大気環境下で、迅速かつ工具刃先にダメージを与えない定量的評価方法の確立が切望されている。

(2)これに対し、集光レーザーの微小光スポット中心に、AFM (Atomic force microscope) 探針と工具エッジをそれぞれ自動的に合わせることで、AFM による接触方式の工具エッジ形状測定が実現されている (Gao et al., CIRP annals, 2009)。その一方で、超高精度刃先では測定に伴う軽微な損傷も許容されないことから、非接触での測定実現が求められていた。また、AFM の測定レンジを超える刃先輪郭半径 100 μm 超の工具刃先の迅速評価も課題であった。

(3)このような背景のもと、上記技術の検討過程において、集光レーザープローブのナノエッジ効果による、光の回折限界を超えた精度での超高感度光位置検出手法が見出されている。本研究では、これをもとに、レーザープローブを測定ビームとして用いる、光の回折限界を超えた nm レベルの精度での非接触刃先形状評価手法の開発を試みた。

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は、次世代ナノ精密機械加工技術に要求される超精密工具刃先ナノレベル形状評価を実現することである。集光レーザービーム (レーザープローブ) を利用し、光の回折限界を超えた分解能で 3 次元工具エッジ形状を非接触かつ高速で評価する「ナノエッジ効果レーザープローブ」の原理確立に挑戦する。

(2)また、ビームウェストにおいて回折限界にまで絞られたマイクロサイズのレーザープローブを工具刃先エッジに照射した際の通過光量をもとに、nm 級の分解能でエッジ位置を検出 (ナノエッジ効果) するエッジ検出手法と、レーザープローブを生成するレンズの原理性質を利用したレーザープローブ走査手法に立脚した超精密刃先形状評価装置を構築し、従来の光計測技術では困難な、光の回折限界を超えた先端丸み径を有する工具刃先の非接触・定量的評価の実現を試みる。

3. 研究の方法

(1)レーザープローブ光学系の設計および試作
光の回折限界を超える分解能での工具刃

先形状評価を実現するため、波動光学に基づく回折光学シミュレーションモデルを構築し、主に球面収差による影響を定量的に評価するとともに、半導体レーザーを光源として用い、コンパクトな形態のマイクロレーザープローブ (図 1) 光学系を設計するとともに、プロトタイプを試作する。

(2)工具刃先輪郭形状評価実験

(1)で試作したマイクロレーザープローブについて、レーザープローブ出力と走査系から得られるプローブ走査位置をもとに工具刃先の輪郭形状を算出する測定アルゴリズムを構築するとともに、基礎特性評価および工具刃先輪郭形状の評価を試みる。

(3)工具刃先切れ刃稜丸みに沿ったレーザープローブ走査を実現する光学系の設計・試作

(1)で試作のレーザープローブ光学系に、ケプラー型のレンズ対を平行駆動するレーザー走査機構を導入して、工具エッジ 3 次元形状評価装置光学系 (図 2) のプロトタイプを構築するとともに、レーザープローブ出力を用いた工具切れ刃稜丸み径評価の実現可能性を検討する。

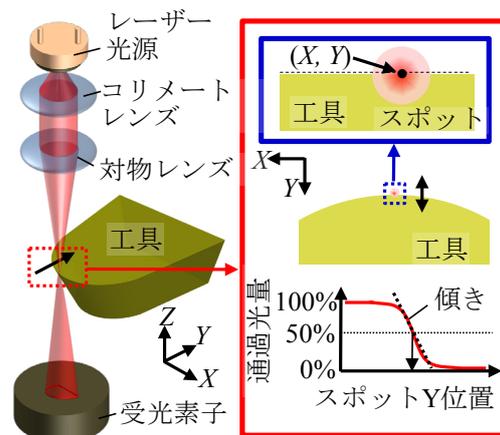


図 1 マイクロレーザープローブ

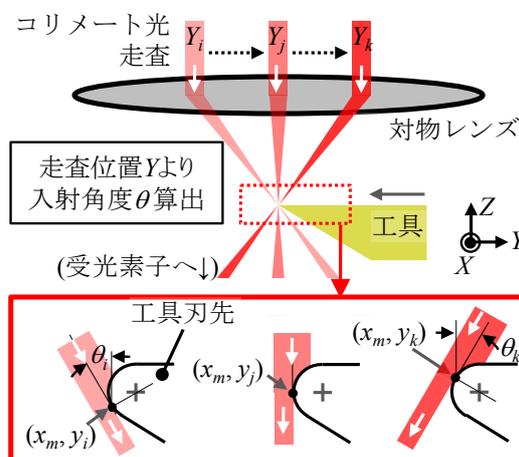


図 2 工具エッジ 3 次元形状評価装置光学系

4. 研究成果

(1) 波動光学に基づく回折光学シミュレーションモデルを構築し、球面収差がレーザープローブ径に及ぼす影響を評価した結果、当初予定していた小型レンズではビーム径が大きくなってしまったことが判明した。

(2) これを受け、高精度対物レンズを採用したレーザープローブ光学系を設計し、プロトタイプを構築した (図 3)。

(3) (2) で構築したレーザープローブのプロトタイプについて、実験的に基礎特性を評価した。市販のビームプロファイラでは定量的かつ精密な評価が困難であるため、従来手法であるナイフエッジ法とともに、レーザープローブの受光素子 (PD) を利用する新たな手法である PD エッジ法を用いて焦点面でのレーザープローブ径評価を試みた。その結果、従来手法および PD エッジ法で理論計算値とよく一致するビーム径を得ることができ、開発したレーザープローブで小径ビームが実現できていることが確認された (図 4)。併せてレーザープローブの感度を実験的に評価した結果、光の回折限界を超える、高い測定分解能が望めることが実験的に確認された。

(4) このマイクロレーザープローブを用いてシングルポイントダイヤモンド工具の刃先輪郭を走査して得られたプローブ出力をもとに、刃先輪郭形状の復元を試みた (図 5) 結果、電子顕微鏡での観察結果とよく一致する刃先輪郭形状が得られることが確認された。これらの結果から、本開発のレーザープローブの工具刃先輪郭形状評価に対する有効性が確認された。

(5) 次に、工具刃先切れ刃稜丸み径評価へのマイクロレーザープローブの応用を検討した。レンズ光軸に対して平行な入射ビームは常に焦点面の一点に集光される対物レンズの物理的特性を利用した、工具エッジに対するレーザープローブ入射角度走査を検討した。プローブ入射角を走査した際のレーザープローブ出力の理論計算を試みた結果、工具エッジの切れ刃稜丸み径に応じたレーザープローブ出力変化が得られることが理論計算で明らかになり (図 6)、本手法による刃先丸み径の定量的評価の実現可能性が示された。

(6) この理論計算の結果を受け、切れ刃稜丸みに沿ってのレーザープローブ走査を実現する光学系を検討し、(1) で構築した光学系をベースとして入射ビームを平行走査する新たなプロトタイプ光学系を構築した (図 7)。

原理検証のため、構築した光学系を用いて、切れ刃稜丸み径の比較的大きい (10 μ m) 超硬切削工具を測定対象として、エッジに沿った集光ビーム走査を試みたところ、シミュレーション結果には見られない低空間周波数成

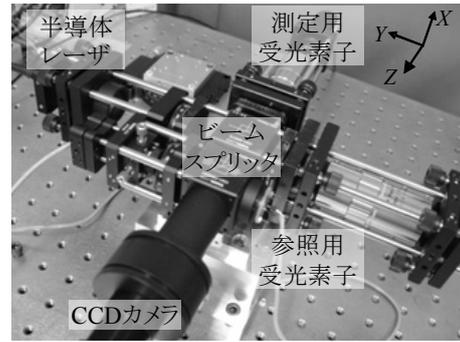


図 3 レーザプローブ光学系プロトタイプ

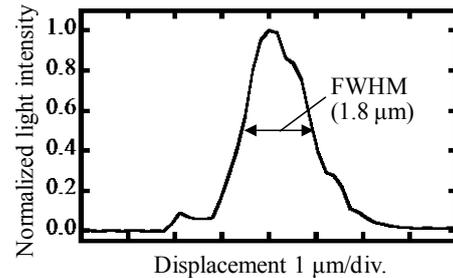


図 4 レーザプローブのビーム径評価結果

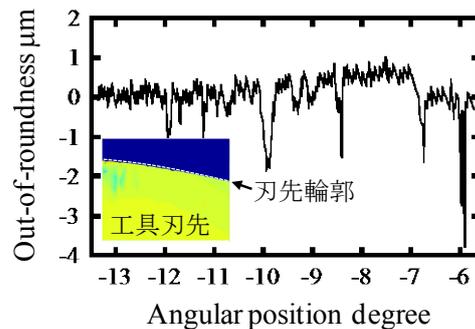


図 5 工具刃先輪郭形状評価結果 (例)

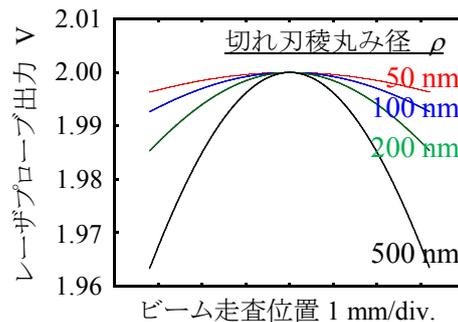


図 6 切れ刃周り走査時のレーザープローブ出力シミュレーション結果

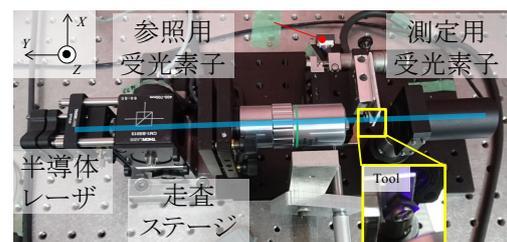


図 7 工具エッジ 3 次元形状評価装置光学系プロトタイプ

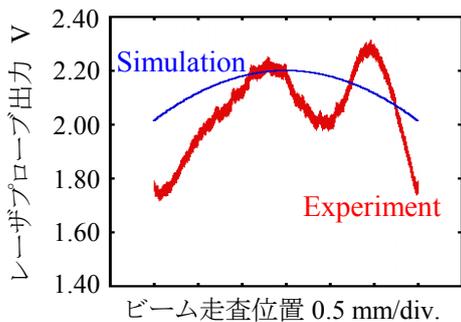


図8 切れ刃周り走査時のレーザープローブ出力測定結果

分を含むものの、概ね理論計算値と一致するレーザープローブ出力変化が得られることが明らかになった(図8)。

(7) この低周波成分の原因を実験的に検討したところ、入射ビーム走査時のビーム径揺らぎ、およびビーム走査系の運動誤差が影響していることが確認された。その一方で、レーザープローブ出力の繰り返し性が良好であることから、ビーム走査系の運動誤差を外部センサ等で計測した結果をもとにその影響を補正することで、提案手法により工具刃先切れ刃稜丸み径の定量的評価が実現できる可能性が実験的に見出された。

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4件)

① Yuki Shimizu, SungHo Jang, Wei Gao, Design and testing of an optical configuration for multi-dimensional measurement of a diamond cutting tool, *Measurement*, 査読有, Vol. 94, 2016, 934-941
DOI: 10.1016/j.measurement.2015.11.040

② 清水 裕樹, 陳 遠流, 張 城豪, 伊東 聡, 高 偉, 超精密形状計測加工システム—ダイヤモンド切削工具の機上ナノ計測—, 機械技術, 査読無, Vol. 64, 2016, 28-31
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020863352/>

③ Yuki Shimizu, Shota Nakagawa, SungHo Jang, Yuan-Liu Chen, So Ito, Wei Gao, Multi-dimensional measurement of tool edge geometry with an optical probe, Proceedings of The 5th International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2016), 2016, (USB)

④ Yuki Shimizu, Taiji Maruyama, Yuan-Liu Chen, So Ito, Wei Gao, Computer simulation on the optical configuration of an ultra-sensitive angle sensor based on laser autocollimation, Proceedings of the

16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2016, (USB)

[学会発表] (計3件)

① Yuki Shimizu, Taiji Maruyama, Yuan-Liu Chen, So Ito, Wei Gao, Computer simulation on the optical configuration of an ultra-sensitive angle sensor based on laser autocollimation, The 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2016年11月14日~16日, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市)

② Yuki Shimizu, Shota Nakagawa, SungHo Jang, Yuan-Liu Chen, So Ito, Wei Gao, Multi-dimensional measurement of tool edge geometry with an optical probe, The 5th International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2016), 2016年8月15日~17日, University of Macau (マカオ, 中国)

③ 中川 翔太, 張 城豪, 清水 裕樹, 陳 遠流, 伊東 聡, 高 偉, ダイヤモンド切削工具切れ刃の光学式形状測定に関する研究—切削工具切れ刃輪郭形状の測定—, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015年9月4日~6日, 東北大学 (宮城県仙台市)

○出願状況 (計1件)

名称: 回転角度検出装置および回転角度検出方法

発明者: 清水 裕樹, 高 偉, 伊東 聡,
陳 遠流, 丸山 泰司

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2016-012697

出願年月日: 2016年1月26日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 裕樹 (SHIMIZU Yuki)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70606384

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

高 偉 (GAO Wei)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70270816