

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206016
 研究課題名（和文） 次世代マイクロダイヤモンドツールの3Dナノメートルエッジ形状の高速高精度計測
 研究課題名（英文） High Speed and High Precision Measurement of Nanometric 3D Edge Profiles of Next Generation Diamond Micro-Tools
 研究代表者
 高 偉（GAO WEI）
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70270816

研究成果の概要： 先端のコナ半径が非常に小さな（1 μm 程度）超精密切削加工用のダイヤモンドツールのエッジの形状を原子間力顕微鏡（AFM）により計測するため、専用の計測装置を製作した。また、計測の際に必要な AFM プローブとツールとの位置合わせ（アライメント）を実現するため、光プローブを利用したアライメント機構を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	23,700,000	7,110,000	30,810,000
2007年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
総計	38,500,000	11,550,000	50,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード： エッジ，3次元形状，計測，マイクロ，工具，光プローブ，アライメント，AFM

1. 研究開始当初の背景

液晶ディスプレイ用導光板、DVD/CD ピックアップ用フレネルレンズなどの3次元微細形状を持つ高機能光学部品の多品種変量生産が超精密切削技術によって可能となっているが、製品の高性能化に伴い、超精密単結晶ダイヤモンド切削ツールのマイクロ化、高精度化が一層要求される。

このようなダイヤモンドツールには、工作機械の動きを工作物に正確に転写する形状精度の高いエッジ（コーナ輪郭度）と、工作物表面を平滑に仕上げる鋭利なエッジ（丸み半径）が同時に要求される。ピッチや幅が光波長に近い超微細形状の創成に必要な次世代ツールは 1 μm 以下のエッジコーナ半径、

10 nm 以下の丸み半径が求められる。この次世代マイクロツールの高精度高能率製造と使用技術の確立という産業界からの切実な要求に応えるために、超精密ツール研磨機及び超精密旋盤などの加工機上で3次元（3D）ツールエッジ形状を nm の精度で高速高精度に計測することが急務となっている。

2. 研究の目的

原子間力顕微鏡（AFM）の微小でかつ先端が鋭利なプローブ突起（Tip）を次世代単結晶マイクロ・ダイヤモンド超精密切削ツール Edge に高精度・高速に自動アライメントできる Tip-to-Edge 光プローブ機構を提案し、それを備えた高精度でロバストな AFM を開発す

ることによって、超精密加工機上で次世代マイクロダイヤモンドツールの 3D エッジ形状をナノメートルの精度で高速高精度に計測すること。

3. 研究の方法

(1) Tip-to-Edge アライメント光プローブ機構の開発をおこなった。レーザの伝搬軸 (Y 軸) に対して、向かい合うようにカンチレバーとマイクロツールを配置する。Y 軸に関してはビームウェストを基準とし、また X, Z 軸に関してはビームスポットの中心を基準として、ビームウェストにおけるビームスポットの中心に AFM プローブ Tip とツール Edge をそれぞれ合わせることでアライメントを行った。

(2) 高精度ロバスト AFM プローブユニットの開発を行った。微動及び粗動の機構を AFM 側に備える構造にして、加工機上で使えるようにロバスト化を図った。AFM スキャナに静電容量型の変位計を内蔵することにより、スキャナの変位を測定し、形状計測結果を nm オーダの精度で保証する。

(3) マイクロツールエッジ形状測定機の組み立てを行った。Tip-to-Edge アライメント機構と AFM プローブユニットを組み合わせた。そのための治具及び関連回路、ソフトウェアを製作した。

(4) AFM プローブ自体の形状評価を行った。特に摩耗の進展に重点を置き同じプローブを使い続けた場合に、評価される丸みはどのように変化するかを確認した。

(5) マイクロ工具の切れ刃形状の加工機上測定実験を行った。

4. 研究成果

(1) ナノメートルオーダの形状精度を持ち非常に鋭利なダイヤモンド切削工具の刃先の形状を高速・高精度で測定するために、AFM 方式の計測専用装置を製作した。Tip を有する AFM (マイクロ) カンチレバーを工具に接触させてプローブのたわみが一定になるようにプローブを制御させながら工具表面を走査させることでエッジ形状を得る。

(2) AFM によるナノメートルエッジ形状測定の際、AFM プローブ先端と工具先端をお互いに位置合わせること (アライメント) が必要となる。そのため、図 1 のようなレーザ光の集光点であるビームウェストをアライメントの基準としてプローブ先端と工具先端を位置合わせする、Tip-to-Edge アライメント光プローブを提案した。そして、それをを用い

て工具先端と AFM プローブ先端を位置合わせする。

具体的には、図 2(a) (b) のように工具あるいは AFM カンチレバーを微小振動させる方法とレーザ光強度変調を利用する方法を提案した。

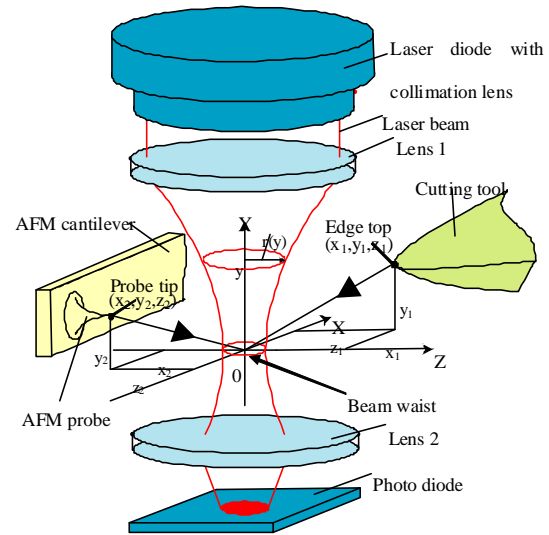
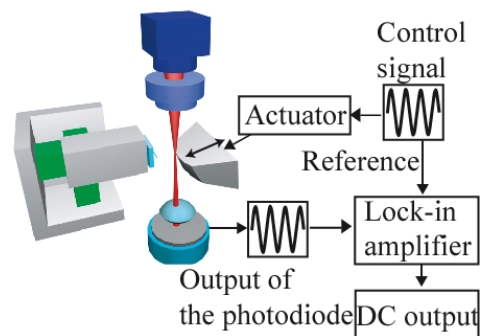
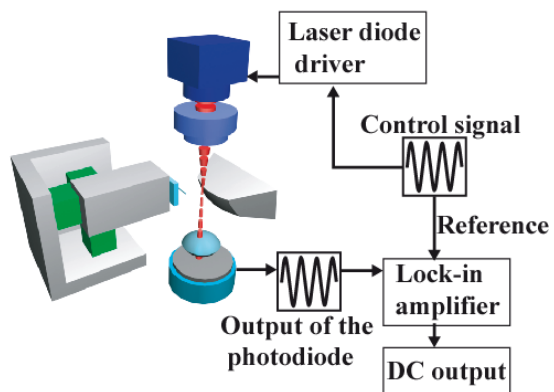


図 1 アライメントシステム



(a) 微小振動



(b) 光強度変調

図 2 アライメント方法

(3) 提案したアライメント光プローブについてシミュレーションを行い、その原理を確認した。また、自己検知型カンチレバーを採用したAFM装置とアライメント光プローブのプロトタイプを製作し、実際にアライメント実験を行った。その結果、微小振動を利用する方法とレーザ光強度を変調させる方法の両方で、サブ μm オーダのアライメント精度を達成することができた。

(4) 機上測定を考慮に入れた小型のAFM装置を開発し、その基本特性を調べた後、未使用、使用後のダイヤモンド切削工具の工具エッジをそれぞれ測定した。未使用の工具と使用済みの工具の形状を比較することで、切削による工具の摩耗を計測することができ、提案した方法の実現可能性を示した。最小二乗法により工具エッジに円を当てはめたときの刃先丸み半径は、未使用工具 92 nm 、使用後工具 219 nm であった。刃先丸み半径を求めることで、工具の微小摩耗を定量的に評価することができた。

(5) 開発した小型AFM装置では手動の位置合わせ機構を使い位置合わせに時間がかかっていたため、これら位置合わせを自動で行えるように、新たにモータステージを搭載した計測専用装置の開発を行った。この装置では、さらにプローブ走査用のアクチュエータにフィードバックセンサをもちいてヒステリシスやクリープ等の低減も行った。

(6) 測定結果から断面を抜き出して、範囲を決定し、最小二乗法により円を当てはめて切れ刃稜丸み半径を評価してきたが、その評価値が評価者の主観によって異なる場合があるということが問題となった。そこで方法を改善し、円錐曲線を当てはめさらにその当てはめ領域を自動計算により最適化することで切れ刃稜丸み半径を自動評価できるようにし、単に範囲を指定して最小二乗法により円を当てはめるよりも定量的な評価につながることを示した。

(7) 測定結果から輪郭を抽出する方法を示し、実際に製作した装置で得られた測定結果をもとに、輪郭度の評価を試みた。コーナ半径が、公称 $200\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ の工具ではコーナ半径がそれぞれ $205\ \mu\text{m}$ 、 $34\ \mu\text{m}$ 、 $8.1\ \mu\text{m}$ と評価されることを確認した。その結果から、製作した装置が、マイクロ工具についてのコーナ半径の管理に利用できることを示した。さらに、図3のように製作した装置がコーナ半径 $1\ \mu\text{m}$ 程度の次世代マイクロダイヤモンドツール極小マイクロ工具の計測についても有効であることが確認できた。

(8) ダイヤモンド切削工具の計測専用装置の開発で得られた成果をベースとして、加工機上での形状測定装置を設計・製作し、機上測定実験を行った。コーナの丸みを持たないバイトについても計測を試みた。

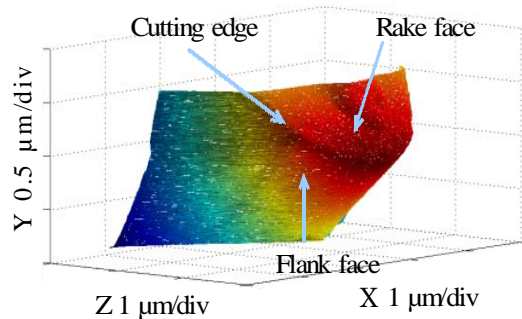


図3 極小コーナ半径の工具計測例

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 8 件)

- ① Takemi Asai, Sayeda Ferdous, Yoshikazu Arai, Yi Yang and Wei Gao; On-machine Measurement of Tool Cutting Edge Profiles IJAT (Vol.3 No.4, 2009に掲載決定), 査読有
- ② 浅井岳見, 荒井義和, 高偉; マイクロ切削工具切れ刃形状の三次元測定装置に関する研究—測定装置の構築と切れ刃形状測定実験—, 精密工学会誌, 75, 7 (2009). (印刷中), 査読有
- ③ Y. Arai, T. Asai, S. Ferdous and W. Gao; 3D Profile Measurement of Nanometer Cutting Edges of Single-Point Diamond Tools for Ultra-Precision Maching, Advanced Material Research, 69-70, (2009), 138-142. (in press) 査読有
- ④ W. Gao, T. Asai, Y. Arai; Precision and fast measurement of 3D cutting edge profiles of single point diamond micro-tools, Annals of the CIRP, 58, (2009). (in press) 査読有
- ⑤ Yuguo Cui, BinFeng Ju, Jun Aoki, Yoshikazu Arai, Wei Gao; AFM with the Slope Compensation Technique for High-speed Precision Measurement of Micro-structured Surfaces, Key Engineering Materials, 381-382, (2008), 35-38. 査読有
- ⑥ Yuguo Cui, Yoshikazu Arai, Takemi Asai, BinFeng Ju and Wei Gao; A high-speed atomic force microscope for precision measurement of micro-structured

surfaces, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 9-3, (2008), 27-32. 査読有

- ⑦ Takemi Asai, Takenori Motoki, Wei Gao, Bing-Feng Ju and Satoshi Kiyono; An AFM-based Edge Profile Measuring Instrument for Diamond Cutting Tools, IJPEM, 8-2, (2007), 54-58. 査読有
- ⑧ Wei Gao, Takenori Motoki and Satoshi Kiyono; Nanometer edge profile measurement of diamond cutting tools by atomic force microscope with optical alignment sensor, Precision Engineering, 30, 4, (2006), 396-405. 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- ① 浅井岳見, 荒井義和, 高偉; 超精密切削工具切れ刃の三次元形状測定に関する研究—加工機上測定実験—, 2009 年度精密工学会春季大会, (2009 年 3 月 11 日), 中央大学.
- ② Takemi ASAI, Yoshikazu ARAI and Wei GAO; Precision Measurement of Edge Profiles of Cutting Micro-tools, 3rd International Conference on Positioning Technology, Hamamatsu, Japan, (Dec. 26 2008).
- ③ Yoshikazu ARAI, Takemi ASAI and Wei GAO; 3D Profile Measurement of Nanometer Cutting Edges of Single-Point Diamond Tools for Ultra-Precision Machining, The 6th CHINA-JAPAN International Conference on Ultra-Precision Machining (6th CJICUPM, 2008), Hunan University, Changsha, China, (Dec. 24, 2008).
- ④ Cui, Y., Arai, Y., He, G., Asai, T., Gao, W.; Compensation of motion error in a high accuracy AFM, ISIST2008, Shenyang, China, (Sept. 17, 2008).
- ⑤ Asai, T., Arai, Y., Cui, Y., Gao, W.; Nanometric Edge Profile Measurement of Cutting Tools on a Diamond Turning Machine, ISIST2008, Shenyang, China, (Sept. 17, 2008), (Poster Session).
- ⑥ 浅井岳見, 荒井義和, 高偉; マイクロ・ダイヤモンド切削工具切れ刃形状測定に関する研究, 2008 年度砥粒加工学会学術講演会, 滋賀県立大学, (2008 年 9 月 5 日).
- ⑦ 崔玉国, 荒井義和, 高偉; 高速高精度原子間力顕微鏡に関する研究, 2008 年度砥粒加工学会学術講演会, 滋賀県立大学, (2008 年 9 月 5 日).
- ⑧ Y. Cui, G. He, Y. Arai, T. Asai, W. Gao; A spiral scanning-type AFM for high-speed and largearea measurement,

euspen 2008, Zürich, Switzerland, (May 21, 2008).

- ⑨ T. Asai, Y. Arai, Y. Cui, W. Gao; An Instrument for Three-Dimensional Edge Profile Measurement of Micro-Cutting Tools, euspen 2008, Zürich, Switzerland, (May 20, 2008).
- ⑩ 浅井岳見, 荒井義和, 高偉; マイクロ・ダイヤモンド切削工具切れ刃形状測定装置の開発, 2007 年度精密工学会東北支部学術講演会, 八戸工業大学, (2007 年 12 月 1 日).
- ⑪ 崔玉国, 荒井義和, 浅井岳見, 高偉; 高速高精度微細形状計測用 AFM に関する研究—傾斜補正による測定の高速度—, 2007 年度精密工学会東北支部学術講演会, 八戸工業大学, (2007 年 12 月 1 日).
- ⑫ Y. G. Cui, B. F. Ju, J. Aoki, Y. Arai and W. Gao; AFM with Slope Compensation Technique for High-speed Precision Measurement of Micro-structured Surfaces, ISMTII 2007, (Sept. 20, 2007) (Poster session).
- ⑬ 浅井岳見, 元木健順, 高偉, 清野慧; ダイヤモンド切削工具 3D エッジ形状の高精度自動測定装置の開発, 2007 年度精密工学会春季大会, 芝浦工業大学, (2007 年 3 月 21 日).
- ⑭ Takemi Asai, Takenori Motoki, Wei Gao, Bing-Feng Ju and Satoshi Kiyono; An AFM-based measuring instrument for edge profile measurement of diamond cutting tool, 2nd International Conference on Positioning Technology, Jeju-do, Korea, (Oct. 26, 2006) (Poster session).

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高偉 (GAO WEI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70270816

(2) 研究分担者

小野 崇人 (ONO TAKAHITO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90282095

厨川 常元 (KURIYAGAWA TSUNEMOTO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90170092

清水 浩貴 (SHIMIZU HIROKI)

九州工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 50323043

(3) 連携研究者