

近接場光を応用した工具刃先検出法の確立

-工具先端位置検出精度の検討-

九州工業大学 ○井上 智輝, ◎カチョーシルンルアン パナート, 鈴木 恵友

要旨

ツールセッタは工作機械上で工具の初期設定において、準備時間の短縮や精度の向上のため用いられている。本研究では回転中のマイクロ工具の高精度検出のため、近接場光を用いた非接触式ツールセッタの新しい検出法の確立を目的とする。本稿は疑似工具と工具の先端位置の検出精度を検討した。直径 $50\ \mu\text{m}$ のスクエアエンドミルが近接場光領域に侵入した場合、基準面における散乱光が検出されるとき、工具先端検出精度は約 $\pm 150\ \text{nm}$ であるとわかった。

1. はじめに

近年、機械製品は年々小型化・高機能化しており、そのために機械加工の高精度化が求められている。ツールセッタは工作機械の加工工具の初期設定において、準備時間の短縮や精度の向上のため用いられている。現在主流のツールセッタは接触式である¹⁾。また近年、微細加工技術に伴い加工工具が小径化しているため、非接触で検出可能なツールセッタが開発されている。非接触式ツールセッタは実際の切削の状態である回転中の工具も測定が可能である。しかし市販されている非接触式ツールセッタは検出精度が $2\ \mu\text{m}$ 程度であるがこれは幾何光学式のため、回折限界およびレーザービーム径の大きさからこれ以上の高精度化が困難と考えられている²⁾。

本研究では、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の検出精度を実現可能にするため、近接場光を用いた非接触ツールセッタの新しい検出法の確立を目的とする。本稿では、疑似工具を用いて工具先端位置の検出可能な範囲を見識し、さらに切削工具を用いて工具先端位置の検出精度を検討したので報告する。

2. 近接場光を応用した工具先端位置の検出原理

光は異なる屈折率の界面に照射した際、屈折する。屈折率 n_1 の物質から屈折率 n_2 の物質の界面に入射した場合、その入射角を θ_1 、屈折角を θ_2 とするとき、スネルの法則である、

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。また、 $n_1 < n_2$ の場合、屈折角 θ_2 が 90° となるときの屈折角は臨界角 θ_c と呼ばれ、

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (2)$$

と示される。そして $\theta_1 > \theta_c$ の場合、光は界面から全反射する。光は全反射界面において低屈折率側に染み込む。これが近接場光（またはエバネッセント光、局在光）と呼ばれている。近接場光の染み込む深さは数百 nm といわれており、指数関数的に減衰する³⁻⁴⁾。局在している近接場光域に工具刃先が侵入すると散乱光が発生する。その散乱光を検知することで工具先端位置を検出することができる。Fig.1(a)に近接場光域に工具が侵入する前の様子、Fig.1(b)に近接場光域に工具が侵入し、散乱光を検知する様子を示す。近接場光の染み込み領域が数百 nm であることを適用することで、 $0.1\ \mu\text{m}$ の検出精度が実現可能と考えられる。

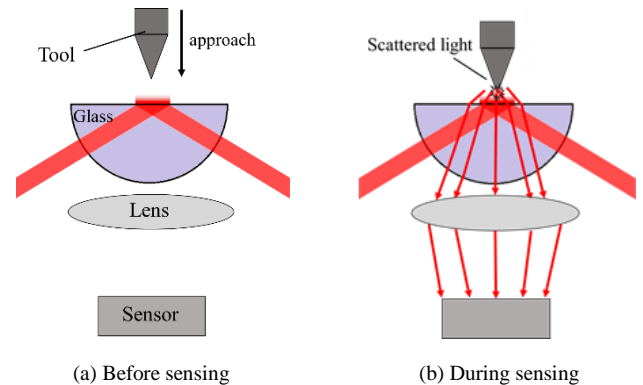


Fig.1 Concept of tool tip detection using evanescent field

3. 工具先端位置検出光学系

近接場光を発生させるため、 SiO_2 ガラスの平凸レンズを採用した。レーザー光をレンズの平面部で全反射させるため、臨界角より大きい入射角で照射し、その平面を基準面とした。次に基準面の上部において、被測定工具を 1 軸ピエゾアクチュエータ（メステック：MPA-UA1S、繰り返し位置決め精度 $\pm 1\ \text{nm}$ ）に取り付け、工具先端位置を制御した。近接場光から発生する散乱光を検出するため、平凸レンズ下部に 10 倍の対物レンズを用いた。対物レンズからの散乱光量を取得するとともに、基準面近傍における工具の接近状態を監視するため、本稿ではフォトダイオードなどの光センサではなく、カメラを採用した。Fig.2 に構築した実験装置を示す。

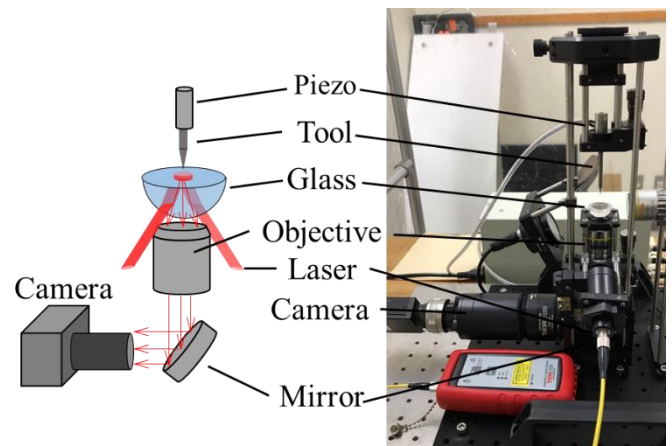


Fig.2 Experimental optical systems

4. 工具先端位置検出実験

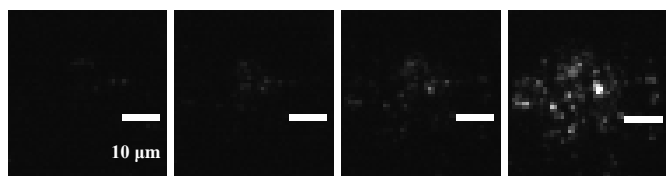
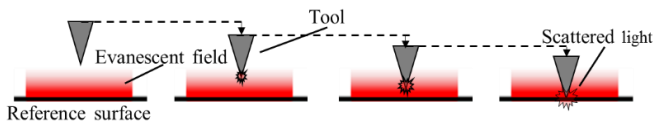
4.1 疑似工具の先端位置検出

工具刃先の検出可能な範囲を確認するため、測定子の先端形状に見立てた曲率半径 $300\ \mu\text{m}$ のピンを採用し、疑似工具とした。ピエゾアクチュエータを用いてピンを基準面に接近させた。実験条件を **Table.1** に示す。

Table.1 Experimental conditions

Laser Illumination		
- Wavelength	[nm]	635
- Incident angle	[deg]	70
Refractive index		
- Glass lens		1.5
- Atmosphere		1.0
Numerical Aperture (NA)		0.3

ピンを基準面に接近させると、散乱光がある位置から上昇した。散乱光が上昇する直前の相対距離を $0.00\ \mu\text{m}$ とした。散乱光を観測してから3回目の観察した結果を **Fig.3** に示す。またピンを基準面に接近させた際の散乱光量の増加を **Fig.4** に示す。1回目の測定では、散乱光の上昇が観測された。2回目の測定では、さらに $140\ \text{nm}$ ピンを接近させ、散乱光量は指数関数的に増加し続けた。そして3回目以降の測定では、さらにピンを基準面に接近させると **Fig.4(b)** に示すように近接場光を検知してから $310\ \text{nm}$ の位置で、散乱光量の指数関数的な増加が見られなくなった。これはピンが基準面に接触したためと考えられる。このことから今回の実験条件における近接場光の染み込み領域は、 $300\ \text{nm}$ 程度であった。



(a) $-1.0 \sim 0\ \mu\text{m}$ (b) $0.1\ \mu\text{m}$ (c) $0.2\ \mu\text{m}$ (d) $0.3\ \mu\text{m}$

Fig.3 Scattered light from pin tip

4.2 マイクロ切削工具の先端位置検出

ピエゾアクチュエータにマイクロ切削工具であるスクエアエンドミル(日進工具:MSME100)を取り付け、同様に工具先端位置検出を行った。工具の直径は $0.05\ \text{mm}$ のものを用いた。散乱光を観測してから3回目の観察した結果を **Fig.5** に示し、工具を基準面に接近させた際の散乱光量の増加を **Fig.6** に示す。3回測定した結果、散乱光量の増加曲線は重なっており、再現性が確認された。また3回目の測定において、近接場光を検知してから $310\ \text{nm}$ の位置で指数関数的な変化が見られなくなり、工具が基準面に接触したと考えられる。すなわち、基準面に工具を接近させることで散乱光が検出された場合、工具先端が $\pm 150\ \text{nm}$ の範囲内に位置するため、この範囲が本光学系の検出精度を示す。

5. まとめ

近接場光を応用し、構築した光学系において工具の先端位置検出を行った結果、以下のことがわかった。

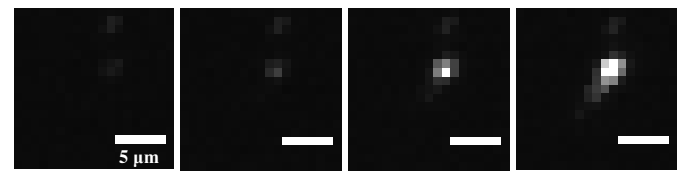
- 疑似工具を基準面に接近させた実験では、染み込み領域は約 $300\ \text{nm}$ であった。
- マイクロ切削工具における近接場からの散乱光量の増加特性は疑似工具と同様であった。
- 本光学系の工具先端位置検出精度は $\pm 150\ \text{nm}$ であった。

[謝辞]

平成28年度(財)金型技術振興財団の助成金を受けて行われたことを付記し、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 株式会社メトロール: 工作機械用ツールセッタ/タッチプローブ 総合カタログ, No.C5-1, 2-25(2015)
- 2) 中井敦生: 机上計測用ソフト「フォームコントロール」と極小工具計測用レーザ, 機械技術 54(7), pp.47-50(2006)
- 3) 出井良和, 木村景一, K. パナート: 層間絶縁膜CMPプロセスにおけるスラリー中の微粒子の挙動観察, 日本機械学会九州支部第63期総会・講演会, pp.97(2010)
- 4) P. Khajornrungruang, K. Kimura, et al: Light scattering model for individual sub-100-nm particle size determination in an evanescent field, Japanese journal of Applied Physics, Volume 55, Number 6S3(2016)



(a) $-1.0 \sim 0\ \mu\text{m}$ (b) $0.1\ \mu\text{m}$ (c) $0.2\ \mu\text{m}$ (d) $0.3\ \mu\text{m}$

Fig.5 Scattered light from tool tip

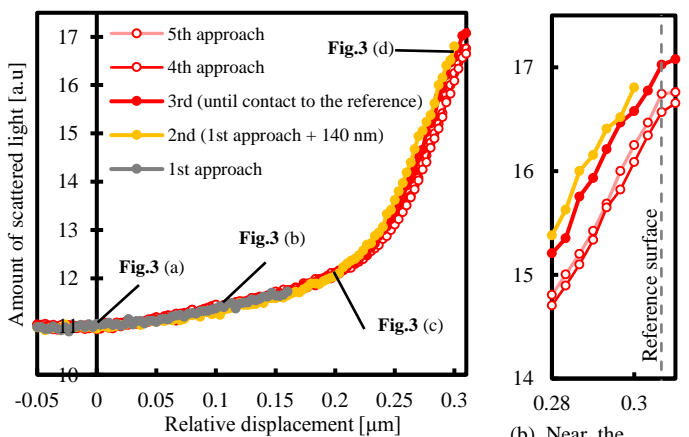


Fig.4 Amount of scattered light from pin tip in evanescent field

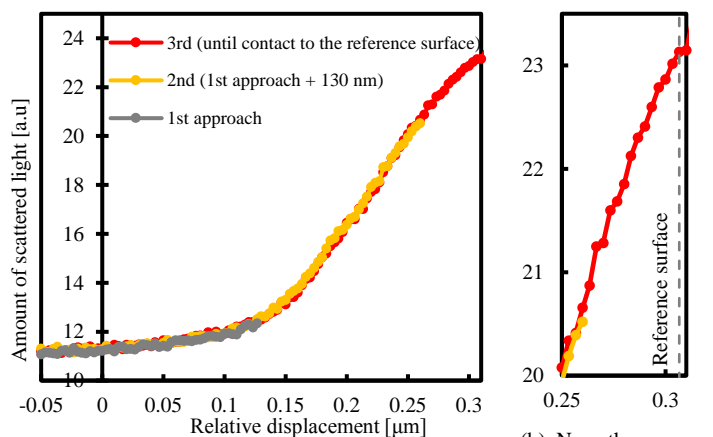


Fig.6 Amount of scattered light from tool tip in evanescent field