多波長近接場光を用いた工具刃先高さ位置の非接触ナノスケール検出に関する研究（第１報）

生産技術部
寺山　裕
九州工業大学大学院 情報工学研究院
知的システム工学研究系 先進機械分野
カチョーンルンルアン・パナート
緒方　晃輝

超精密加工の高能率化を実現するためには，工具の刃先高さ位置（工具長）やワーク加工面形状の高精度な機上計測が重要である．機上計測として，接触式は小径工具刃先の破損などの課題があり，近年は非接触式が注目されている．九州工業大学では，測定基準面から数百ナノメートルのみ発生する近接場光を用いて，工具刃先高さ位置をナノスケール精度で非接触に検出する手法を提案していた．本研究では，九州工業大学と同手法に関する共同研究を行い，小径工具の刃先高さ位置を数値化するモデルを確立し，様々な工具での検証および検出深度の拡大を目指している．本報では，工具のみならず小径スタイラスの先端高さ位置の測定を試み，測定精度を検証した．その結果，基準面から 120 nm の範囲において±20 nm（2σ）の不確かさで先端高さ位置が測定可能であった．また，先端の早期検知による基準面への接触防止のために，検出深度を拡大する必要があった．そこで，近接場光を励起光とした落射光場を，基準面上の蛍光溶液を用いて形成し，基準面に接近するスタイラス先端を観測した．その結果，基準面から約 200 μm の深度での検出を実証できた．

1. はじめに

高性能かつ微細な光学製品，医療機器，半導体製造装置の構成部品を生産するため，製造業では金型や微細な部品を，高品質に加工する技術が求められている[1-3]．特に非球面レンズ用金型では，形状精度 0.05 μm PV 程度，表面粗さ 1 nm Ra 以下が要求される．

一般に精密加工には数値制御式加工機が用いられ，ワーク原点を基準とした工具刃先位置の三次元移動量（加工パス）が，図面や設計値に基づいて数値で厳密に指令されている．しかし，前段取りでの加工誤差や作業者の取付け誤差によるワーク面変位に加え，工具の刃先高さ位置（工具長）は主軸の熱膨張・工具摩耗現象[4]，回転時の工具振れなどで随時変動している．そこで，これら要因による加工誤差を低減するために，ワーク座標系を相対基準にした工具刃先高さ位置，並びにワーク面形状を加工前に工作機械上（以降，機上）で高精度に測定し補正する技術が重要である[5]．

特に超精密加工環境下で用いられる小径工具の刃先高さ位置を測定する場合，接触式計測では刃先が破損する恐れがあるため，非接触式計測（レーザ方式，撮像方式）が用いられている．しかし，光学的な回折限界が要因となり，小径工具の刃先高さ位置の繰返し測定精度は実質±1 μm 程度である．そこで，非接触かつ高精度に工具刃先の高さ位置を測定するために多数の研究が進められており，レーザ回折光を用いて工具先端と被加工物表面間の距離を計測する手法[6]や，ダイヤモンド工具刃先の表面から発生させた近接場光に被加工物が侵入した時の散乱光を検出する手法[7]，加工対象となるガラス材内部で近接場光を発生させ加工状態を監視する手法[8]などが提案・検証されている．しかし，いずれも 100 nm 以下の精度で安定して計測する技術は未だ確立されていないため，工具刃先の高さ位置をナノスケール精度かつ非接触に計測する技術が求められている．

また，超精密加工では研磨・修正等の最終仕上げ加工に先んじて，超精密切削による補正加工が行われている．補正加工前に，切削加工後のワーク形状誤差を把握するために，加工機からワークを取外し，

三次元測定機などの専用測定機で高精度に形状が測定されている．しかし，大型または複雑な形状のワークの測定では，測定時間短縮の観点から，機上計測が有効な場合がある [9-11]．スタイラスを用いた接触式の形状計測の場合，先端径や先端高さ位置（スタイラス長）が基準器（マスターボール、ブロックゲージ等）で校正される．しかし，現状機上計測における「スタイラス長の測定・校正」は，図 1 のように，主軸に取り付けられた基準工具とブロックゲージを用いて手動で校正されているため，作業者による操作精度のばらつきが測定誤差を引き起こす要因となっている [12]．ゆえに，工具刃先高さ位置計測と同様に，高精度にスタイラス先端高さ位置を機上で自動計測する技術が求められている．

そこで，我々は多波長近接場光を用いて小径工具の刃先高さ位置を，ナノスケール精度かつ非接触で計測する手法を確立してきた [13-16]．しかし，スタイラスの先端高さ位置の測定は十分に検証されていなかった．また，同技術の実用化を目指すにあたって，測定時間の短縮が課題であるが，工具の高速移動による基準面への接触・折損の恐れがボトルネックとなっていたため，刃先の検出深度拡大が求められている．

本報では，同手法の数値化モデルの確立を目指すと同時に，小径スタイラス先端の高さ位置測定を検証した．また，工具刃先の検出深度をマイクロメートルスケールに拡大するために，近接場光で励起された蛍光溶液から発生する蛍光落射光場を活用した手法を検証した結果を報告する．

2. 小径スタイラス先端高さ位置の測定原理

図 2 に近接場光の発生原理を示す．レーザ光を高屈折率 n_{high} 媒質（例えば，ガラス基板など）側から低屈折率 n_{low} 媒質（例えば，大気など）側に向けて入射角 θ_i（θ_i>臨界角 θ_c=arcsin[n_{low}/n_{high}]）の全反射条件で照射する．この時，自由空間伝搬をしない近接場光と呼ばれる光が，基準面近傍（境界面から数百ナノメートル程度）のみに局在して発生する [13-15]．この近接場光の光強度 I_{ev} は式(1)の通り，基準面から垂直の高さ z 方向へ指数関数的に減衰する．

$$I_{ev}(z,\lambda) = I_{ev}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z}{z_\zeta(\lambda)}\right] \qquad (1)$$

ここで，λ はレーザ光波長を表し，$I_{ev}(z_0)$は表面での光強度,すなわち照射レーザの光強度そのものである．また $z_\zeta(\lambda)$は，しみこみ深さ距離定数（近接場光強度が $I_{ev}(z_0)/e$ になる時の高さ; e はネイピア数）であり，式(2)に示すように，照射するレーザ光波長 λ と入射角 θ_i，各媒質の屈折率 n に依存して定められる．

$$z_\zeta(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{(n_{high})^2 \sin^2\theta_i - (n_{low})^2}} \qquad (2)$$

次にスタイラスの先端高さ位置の非接触測定原理を示す（図 3）．この近接場光内へ侵入したスタイラスの先端から散乱光が発生する．この散乱光強度

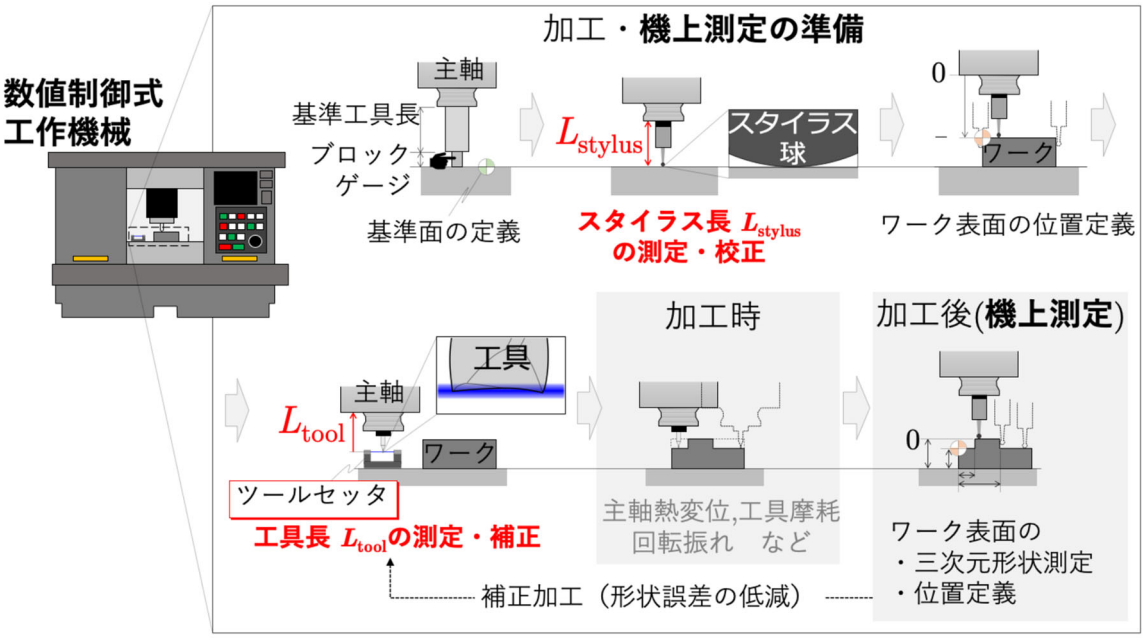


図 1　工具刃先高さ位置（工具長）およびスタイラス先端高さ位置（スタイラス長）の機上計測の必要性

$I_{sc}(z_{tip})$は，スタイラスの先端高さ位置 z_{tip}，すなわち先端と基準面間の距離に依存し，式(3)に示すように近接場光の光強度分布に比例する．

$$I_{sc}(z_{tip}) = KI_{ev}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda)}\right]$$
$$= I_{sc}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda)}\right] \quad (3)$$

ここで，K は近接場光強度から散乱光強度への換算係数であり，波長に依存した各材質の光学特性やカメラの感度（量子効率）が反映される．主要たるスタイラスの先端高さ位置 z_{tip} は式変形により，式(4)で求められる．

$$z_{tip} = z_\zeta \log_e\left[\frac{I_{sc}(z_0)}{I_{sc}(z_{tip})}\right] \quad (4)$$

しかしながら，これまでの単波長光源による計測のみでは，基準面におけるスタイラス先端からの散乱光強度 $I_{sc}(z_0)$が接触時まで未知なため，絶対的な高さ位置を測定するには先端を接触させる必要があり，小径工具の刃先が破損する恐れがある．

そこで，本手法を応用し，多波長の近接場光を用いた小径スタイラスの先端高さ位置を高精度に測定する手法を図 4 に示す．レーザ光の波長ごとに近接場光のしみ込み深さ距離定数 $z_\zeta(\lambda)$が異なるため，先端からの散乱光検出タイミングや散乱光量比によって，先端高さ位置 z_{tip} を高精度に検出できる．レーザ光波長が λ_1, λ_2 の場合のスタイラスの先端からの散乱光量は，式(5), (6)と表せる．

$$I_{sc}(z_{tip}, \lambda_1) = KI_{ev}(z_0, \lambda_1) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda_1)}\right] \quad (5)$$

$$I_{sc}(z_{tip}, \lambda_2) = KI_{ev}(z_0, \lambda_2) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda_2)}\right] \quad (6)$$

式(5)と(6)を連立させると，式(7)が定式化され，基準面からのスタイラスの先端高さ位置 z_{tip} は，既知数 $z_\zeta(\lambda)$と，カメラで検出された散乱光量 $I_{sc}(\lambda_1)$と $I_{sc}(\lambda_2)$ の比のみで，換算係数なく測定できる．

$$z_{tip} = \frac{z_\zeta(\lambda_1)z_\zeta(\lambda_2)}{z_\zeta(\lambda_1)-z_\zeta(\lambda_2)} \log_e\left[\frac{I_{sc}(\lambda_1)}{I_{sc}(\lambda_2)}\right] \quad (7)$$

3. 小径スタイラスの先端高さ位置測定

3.1 多波長近接場光による先端高さ位置測定手法

多波長近接場光を用いて，小径スタイラスの先端高さ位置をナノスケール精度で非接触に計測する手法の基礎検証を試みた．製作した装置を図 5 に，光学系の各種実験パラメータを表 1 に示す．小径スタイラスはピエゾアクチュエータに取付けて，ナノメートル精度で先端をガラス基準面に接近させた．近接場光内にスタイラス先端が侵入すると，先端から散乱光が発生し，光学系で集光･結像され，撮像素子で先端が可視化された．

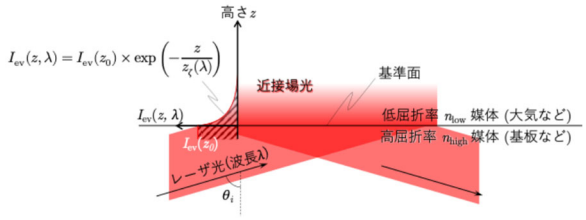


図 2　近接場光の発生

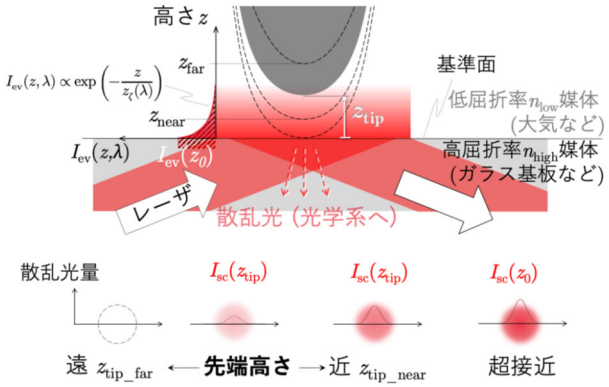


図 3　小径スタイラスの先端検出原理

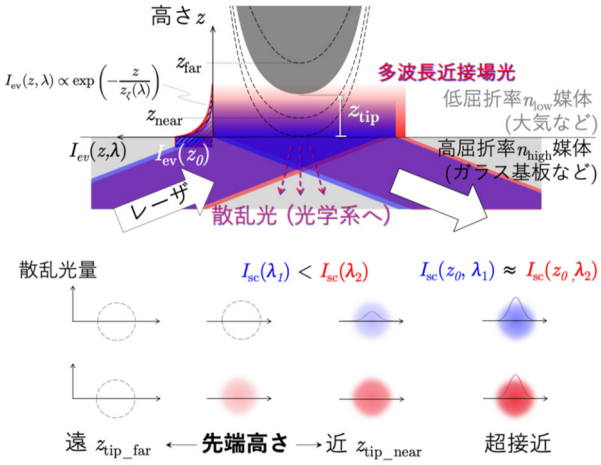


図 4　小径スタイラスの先端高さ位置測定原理

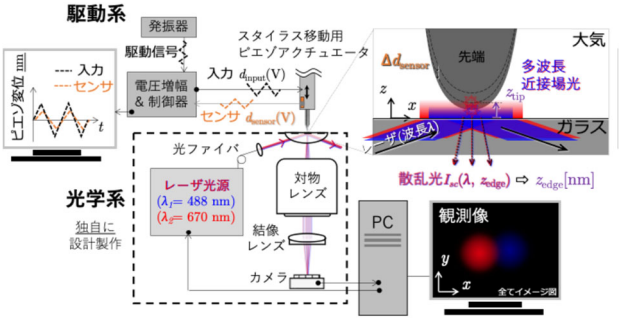


図 5　実験装置（駆動系・光学系）の概要図

3.2　スタイラスの先端高さ位置測定結果

先端直径 0.1 mm のスタイラスを，ピエゾアクチュエータを用いてガラス基準面へ，変位量 d_{input} [nm] の指示で接近させた．同時に，アクチュエータ内部に搭載されたひずみゲージで，実質的なアクチュエータの変位量 d_{sensor} [nm]を測定した．一方，光学系ではスタイラスの先端から発生した散乱光を検出した．この散乱光量をもとに，式(7)を用いて，スタイラスの先端高さ位置 z_{tip} を算出し測定した．

背景ノイズ除去後の観測像およびスタイラスの先端高さ位置結果を図 6 に示す [17]．撮影条件は露光時間 25 ms，撮影速度 40 fps であった．本実験では，スタイラスの先端高さ位置が，基準面から 120 nm の範囲まで±20 nm（2 σ）の不確かさで測定された．このことから，本手法が工具の刃先高さ位置測定 [13-16] のみならず，スタイラスの先端高さ位置測定にも有効であることが確認された．

4.　蛍光落射光場による工具先端の検出深度拡大

4.1　工具刃先のマイクロスケール検出原理

散乱光に基づく工具の刃先高さ位置測定に加え，検出深度を拡大するために，図 7 に示すような近接場光を励起光とした落射光場を形成する [18]．この光場を形成するために，基準面上に蛍光溶液（励起波長 λ_{ex}，蛍光波長 λ_{em}）を満たす．この溶液内の蛍光成分は，波長 λ_{ex} の“近接場光” および ”近接場光内に在る物質からの散乱伝播光”で励起され [19]，蛍光波長 λ_{em} の落射光場が発生する．この光場の照明範囲は，近接場光領域のみならず，蛍光済の分子が溶液内で放射的に拡散移動する領域も含まれる [20]ため，近接場光外に及ぶ刃先検出が期待される．

蛍光落射光場内で工具刃先は図 8 のように検出される [18]．刃先が基準面に接近すると，光源となる蛍光溶液の体積が刃先−基準面間で減少するため，刃先直下が周囲に対して相対的に低蛍光領域となる．

表１　実験パラメータ

Laser illumination		(λ_{blue})	(λ_{red})
- wavelength λ	nm	488	670
- incident angle θ_i	deg	50	
- penetration depth z_ζ		69	94
CMOS camera			
- pixel size	μm^2	5.48 × 5.48	
- exposure time	ms	25	
- recording speed	fps	40	
Optical system			
- total magnification		30×	
- numerical aperture		0.4	

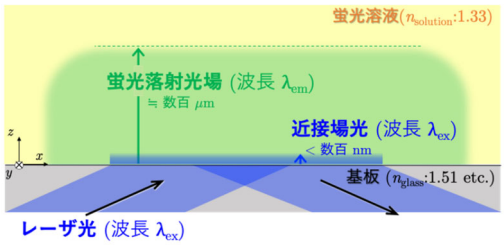


図 7　近接場光による蛍光落射光場の発生

この領域では周囲より暗い蛍光像が得られる．つまり，刃先の蛍光像の明暗を観測することで，近接場光外に拡大された深度で工具刃先を検出できる．

4.2　検出深度の拡大検証結果

波長 450 nm のレーザ光源で近接場光を発生させ，ガラス基板上の蛍光溶液（励起波長 λ_{ex}: 450 nm，蛍光波長 λ_{em}: 530 nm）を励起し，蛍光させることで落射光場を形成した．基礎検証として直径が 0.3 mm のスタイラス先端を，ガラス基準面の上方数百 μm から約 50 μm ごとに基準面へマイクロメータで接近させた．基準面から数マイクロメートル近傍では，過接触防止のため，ピエゾアクチュエータでナノ変位制御した．

撮像した結果を図 9 に示す．検証した結果，蛍光

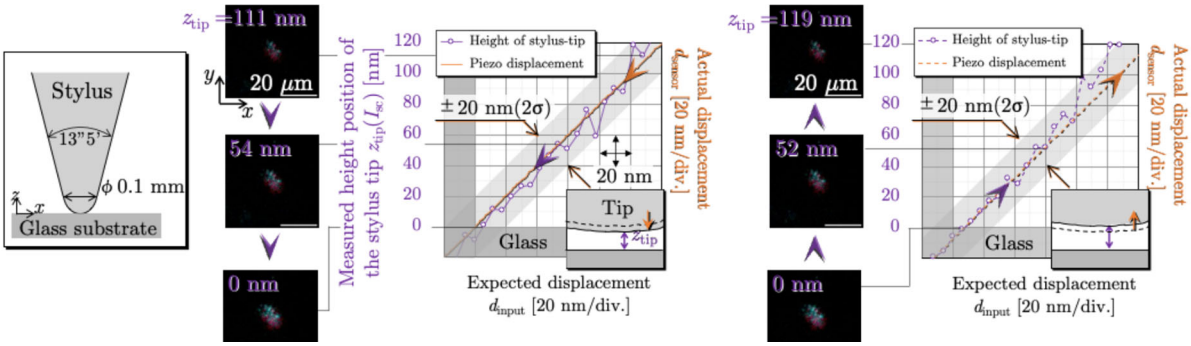


図 6　スタイラスの先端高さ位置測定結果 [17]

落射光場でのスタイラス先端の検出深度は約 200 μm であることが明らかとなり，近接場光による検出深度である 200～300 nm[16]と比較して，大幅に拡大させることができた．

将来的には，多波長近接場光による基準面ナノスケール近傍における工具刃先高さ位置計測と，蛍光落射光場によるマイクロスケール深度での検出を，複合して同時に行うことができると期待される．

5. おわりに

多波長レーザ光源による近接場光を用いて，小径工具の刃先から発生した散乱光量を検出し，工具刃先高さ位置をナノスケール精度で非接触に計測する手法の確立を目指した．

本報では，ワーク座標系の定義やワーク表面形状の測定に用いられる，計測用スタイラスに着目した．特に超精密加工において，複雑な三次元形状の接触測定時には，形状追従性に優れた小径スタイラスが用いられる．この時，測定の信頼性を確保するために，確立されたトレーサビリティに基づいて，先端高さ位置（スタイラス長）を基準器で校正し，補正を行うことは極めて重要である．

そこで，小径スタイラス先端の高さ位置計測への本手法の適用性を基礎検証した．本実験では，直径 0.1 mm のスタイラス先端高さ位置が算出され，基準面から 120 nm の高さ範囲において，±20 nm (2σ)の不確かさで測定されることが確認できた．したがって，マイクロ工具のみならず，小径スタイラスに対しても，本手法が有効であることが確認された．

また，近接場光外におよぶ深度でスタイラス先端を検出するために，近接場光を励起光とした落射光場を形成した．この落射光場は，ガラス基準面上に満たされた蛍光溶液（励起波長 450 nm，蛍光波長 530 nm）を励起した際の蛍光で形成された．検出深度の基礎検証として，先端直径 0.3 mm のスタイラスを用いて実験した結果，蛍光落射光場を適用することで基準面から約 200 μm の深度でスタイラス先端が検出され，検出深度を近接場光外にまで拡大できたことが確かめられた．

今後は，超精密加工で用いられる多結晶ダイヤモンド（PCD）工具の光学的特性評価や，測定誤差要因などについて検討し，本手法の基礎検証を進めたい．

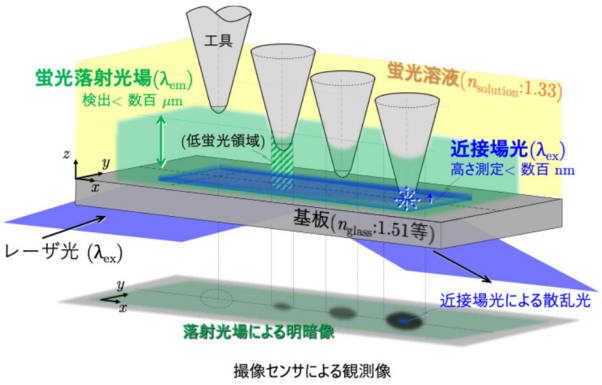


図 8　蛍光落射光場による工具刃先およびスタイラス先端の検出原理

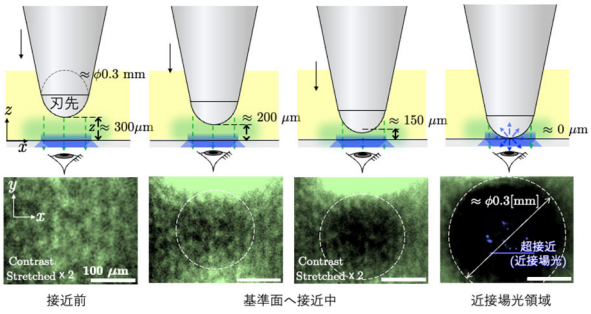


図 9　スタイラス先端の検出・観測像 [18]

参考文献

1) 高谷裕浩: 非接触機上計測のこれまでと展望，精密工学会誌, 90 巻, 5 号 (2024) pp.387-393.
2) 福田将彦: 自動車用精密部品の超精密加工を支える機上測定，精密工学会誌, 85 巻, 7 号 (2019) pp.628-631.
3) 村中昌幸: プラスチックレンズの成形加工，成形加工, 16 巻, 11 号 (2004)
4) 北嶋孝之，奥山繁樹，由井明紀: ダイヤモンド工具によるコバルトレス超硬合金の微細 V 溝プレーナ加工，砥粒加工学会誌, 58 巻, 2 号(2014) pp.34-39
5) 樋口庸介: 5 軸加工機における工具刃先位置測定，芝浦技報, 30 巻 (2024) pp,60-62.
6) カチョーンルンルアンパナート，木村景一，鈴木恵友: レーザ回折光による高速回転中の工具先端と被加工物間の距離計測, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2010) pp.765-766.
7) 吉岡勇人，井手隼人，澤野宏，新野秀憲: 光学的手法を用いた工具－工作物接触状態検知に関する研究, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集 (2012) pp.829-830.

8) 高畑直輝, 柿沼康弘, 青山藤詞郎: ガラスの微細加工における切削状態モニタリング技術の開発, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (2009) pp.567-568.
9) 佐藤遼, 高偉: 加工機上における精密計測, 砥粒加工学会誌, 67 巻, 6 号 (2023) pp.329-332.
10) 大西 孝, 鈴木 浩文, 山本 雄士, 森脇 俊道, 沖野 正, 守安 精, 山形 豊: 非球面形状のオンマシン計測システムの開発（第 1 報）-接触型オンマシン計測システムの高精度化-, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2006 年度精密工学会秋季大会 (2006) pp.217-218
11) 高増潔, 高橋哲: 次世代製造を支える形状測定技術の進化と課題, 計測と制御, 64 巻, 6 号 (2025) pp.361-366.
12) 森 茂樹, 神戸 礼士, 松下 哲也: 工作機械におけるタッチプローブ長の自動校正システムの開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2025 年度精密工学会秋季大会 (2025) pp.75-76.
13) 井上智樹, カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友: 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−, 第 24 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集 (2017) pp.9-10.
14) 甲斐 雅貴, カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友: 近接場光を応用した工具刃先計測の数値シミュレーションによる散乱光特性の評価 – 第二報: 工具材への金属モデルの適用-, 2021 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2021) pp.635-636.
15) カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友, シンソムブーン カウィー, 井上智樹: 超近接スイッチ, 特開 2019-164205, 2019.9.26 公開.
16) 寺山裕, カチョーンルンルアンパナート: 令和 6 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, No.33 (2025) pp.77-81.
17) Y. Terayama, K. Ogata, P. Khajornrungruang, Y. Ohta: Nanoscale Noncontact Detection and Measurement of Micro-Tool-Edge height Position by using Evanescent light, Proc. of the 11th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (2025) OS13-13.
18) 緒方晃輝, 寺山裕, 太田有紀, カチョーンルンルアンパナート: エバネッセント光場・落射光場観測を併用した工具長検出の検証−蛍光の落射光場生成−, 2026 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (2026) pp.195-196.
19) 鈴木健史: バイオイメージングで知っておくべき蛍光顕微鏡の基礎, 札幌医科大学大学院医学研究科 医学研究入門セミナー, p.7.
20) 木下修一: 生命科学を理解するための蛍光の基礎, 分光研究, 63 巻, 1 号 (2014) p.37.