

第31回青葉工学研究奨励賞



次世代共焦点プローブで切り拓く先駆的3次元形状計測システムの開発

東北大学大学院工学研究科
 ファインメカニクス専攻
 助教 佐藤 遼

精密部品の品質保証のためには3次元形状計測は必要不可欠な技術となっている。3次元形状計測は一般的に2軸平面走査機構と高さ測定手法の組み合わせにより実施される[1]。この高さ測定手法の一つとして、共焦点光学系原理に基づき点光源から射出された光を測定対象物表面へ集光し、この集束光を測定対象物表面高さ測定用光プローブとして用いる共焦点プローブがある。これまで共焦点プローブの高分解能化・高速化のために光学系構成やその信号処理法が多数研究[2]されてきている。一方で、これら提案手法は「平坦表面」測定つまり段差測定が前提となっていた。そのため近年需要が拡大している歯車波面やX線光学用ミラー表面など複雑な「自由曲面」における3次元形状測定へ共焦点プローブを適用することは制限されていた。本報では、これまでにない「非線形光学」に基づく共焦点プローブ[3]を新たに提案し、その適用範囲を拡大可能とした研究成果を紹介する。

「自由曲面」測定へ共焦点プローブを適用する場合、対象物表面における傾斜角によって高さ測定精度が低下する問題があった[4]。この問題を解決するためには、「高さ」測定に加えて「傾斜角度」を計測し補正することが喫緊の課題であった。そこで筆者は、非線形光学現象である第二高調波発生に着目した。第二高調波発生とは、第二高調波発生媒質に入射した光(基本波)の周波数 ν に対して、その2倍の周波数 2ν をもつ光(第二高調波)が発生する現象である。第二高調波発生を利用した角度センサと変位センサはそれぞれ提案されているが、双方とも「測定対象物」が第二高調波発生媒質であったことから、3次元形状計測への適用には課題があった[1]。これらのセンサに着想を得て、第二高調波発生媒質を「測定対象物」に限定するのではなく、共焦点プローブにおける「非線形光学フィルタ」として採用する独創的な手法を提案した。

従来型共焦点プローブは、対象物面反射光を検出器前面に配置されたピンホールや光ファイバ等の「空間フィルタ」に通して検出していた。この場合、プローブ焦点面と対象物表面が合致する時のみ反射光が空間フィルタ面へ焦点を結ぶことが可能となり検出強度が最大となる。この効果により焦点面信号のみ高感度に検出可能であることから、共焦点プローブは光軸方向(高さ方向)に高コントラスト/高分解能な計測が可能であった[5,6]。一方で、従来型共焦点プローブでは「空間フィルタ」における角度変化感度が原理的に制限されるため、高分解能「角度」計測には課題が

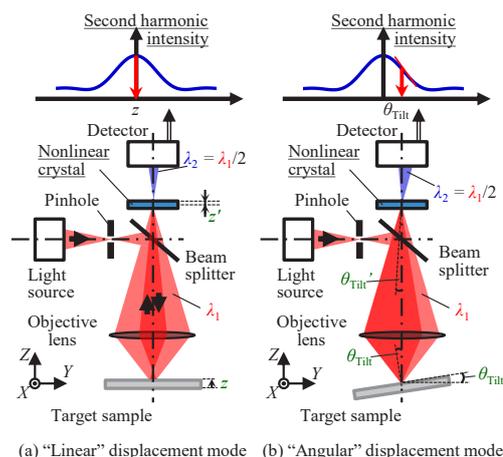


図1. 新たに第二高調波発生媒質を「非線形光学フィルタ」として採用する非線形光学共焦点プローブ

あった。この「空間フィルタ」の原理的制約を打破するために、本研究ではこれまで「空間フィルタ」として使用されていたピンホールや光ファイバ等に替えて、新たに第二高調波発生媒質を「非線形光学フィルタ」として採用する非線形光学共焦点プローブを提案した[3]。プロトタイプ光学系を構築して基礎特性評価実験を実施し、光軸変位(高さ)計測の分解能が約20 nm、角度変位計測の分解能が約5角度秒と評価されたことから、提案型非線形光学共焦点プローブの実現可能性が検証された。この発見により、非線形光学共焦点プローブ単体で測定対象物の「高さ」と「角度」計測の両立を世界で初めて実現可能とした。提案した非線形光学共焦点プローブは、平面走査位置測定用サーフェスエンコーダ[7,8]と組み合わせることにより、「自由曲面」3次元形状測定への応用性が高く、本研究成果が有する発展性・創造性は高いと言える。

- [1] R. Sato et al., Int. J. Automation Technol., 18(4) (2024), 545-580.
- [2] R. Sato et al., Int. J. Prec. Eng. Manuf., 25 (2024), pp. 199-223.
- [3] R. Sato et al., Opt. Express, 31(7) (2023), pp. 11982-11993.
- [4] R. Sato et al., Appl. Sci., 12(9) (2022), 4736.
- [5] R. Sato et al., Meas. Sci. Technol., 31 (2020), 094004.
- [6] R. Sato et al., Appl. Sci., 9(19) (2019), 4084.
- [7] R. Sato et al., Int. J. Automation Technol., 18(2) (2024), 249-256.
- [8] R. Sato et al., CIRP Annals, 74(1) (2025), 691-695.