

Title	ナノ座標測定における光放射圧マイクロプローブに関する研究
Author(s)	道畑, 正岐
Citation	
Issue Date	
Text Version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/11094/2849
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	みち はた まさ き 道 畑 正 岐
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学位記番号	第 2 3 8 0 7 号
学位授与年月日	平 成 2 2 年 3 月 2 3 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科機械工学専攻
学位論文名	ナノ座標測定における光放射圧マイクロプローブに関する研究
論文審査委員	(主査) 教 授 高 谷 裕 浩 (副査) 教 授 竹 内 芳 美 教 授 箕 島 弘 二 教 授 山 内 和 人

論 文 内 容 の 要 旨

マイクロ加工技術の加工精度はサブ μm に達する。このマイクロ部品の3次元形状を評価するため、ナノCMM（座標測定機）の開発が進んでいるが、ボトルネックは測定面の位置検出を担うマイクロプローブである。そこで本研究は、マイクロプローブで初めて現れるプロービング時のマイクロ領域での現象理解を深め、高感度なプローブを開発することを目的とし、光放射圧マイクロプローブを提案するものである。レーザトラップ技術によって直径 $8\mu\text{m}$ のシリカ微粒子を空間に捕捉しプローブ球として用いる。このプローブ球と測定面の相互作用を検出することで測定面位置を検出する。

数値解析で本プローブのばね定数を解析すると、数十 $\mu\text{N/m}$ と従来のものより小さく、高感度な位置検出特性が示唆された。次に、基礎実験として、プローブ球を数百 nm 振動させる振動プローブで位置検出を行うと、 25nm 以下の感度を示した。光放射圧プローブのシステムを設計試作した。作動距離の拡大のため、捕捉光源にラジアル偏光を導入し、プローブ球の捕捉効率を2.5倍改善した。その結果、作動距離は従来の10倍以上、 3.4mm に拡大でき、また、ばね定数の3次元的なばらつきは14%となり、3次元的な等方性を改善できた。また、プローブシステムの性能評価のため、座標測定システムも設計および試作した。

振動するプローブ球の挙動からマイクロオーダーの物理現象を理解するため、力学モデルを提案した。Langevin方程式を基にバネダンパ系によってモデル化できることを実験的に示し、次に、そのモデルを用いた位置検出の基本的原理を検証した。プローブ球が測定面に接近すると、周辺流体の圧縮・膨張によりプローブ球に作用する粘性抵抗が増大する。振動プローブを用いて測定面の数 μm 近傍での粘性抵抗を測定すると、その急峻な変化が確認でき、プローブ振動の減衰が確かめられた。特に垂直面に対して、振幅の減衰は 20nm 程度の繰返し検出精度が得られた。一方で、水平面を座標測定する際、検出精度が 500nm 以上となった。これは、測定面からの反射光と捕捉光源が干渉し発生する定在波のためであった。定在波はプローブ球のばね定数が変化させ、位置検出の精度の低下を招く。この影響を低減するために、プローブの励振周波数に着目し、ばね定数の変化に鈍感で粘性抵抗係数の変化に敏感な励振周波数を検討したところ、プローブの共振周波数よりも 800Hz 程度低い周波数が最適であることが確認できた。これによって水平面を $\pm 64\text{nm}$ での座標測定を可能とした。

次に、プローブ振動と測定面の方向によって、その振動減衰の程度が異なるという現象を利用して、測定面の位置と法線方向を測定可能なプロービング手法を提案した。プローブ球を水平に円軌道を描かせる。このプローブが測定面に接近すると、粘性抵抗の違いから円軌道が楕円軌道に変化する。この楕円の短軸角度から測定面の法線方向、短軸長さから測定面位置を検出した。その結果、位置検出の分解能は 39nm が得られ、面の法線方向の角度測定は $\pm 1.5^\circ$ の精度が得られた。

の角度測定は $\pm 1.5^\circ$ の精度が得られた。

このように、マイクロ領域での振動プローブと測定面間の粘性抵抗係数の変化という相互作用を明らかにした。また、その現象を用いて、約20nm以下の高感度な位置検出を達成し、測定面の位置と法線方向を同時測定可能な新規なプロービング手法を開発した。

論文審査の結果の要旨

近年、要求が高まるマイクロ部品の幾何形状評価のため、ナノメートルオーダーの超高精度な座標測定器（ナノ CMM）が求められている。ナノ CMM の実現のためにはマイクロプローブの開発が必須である。本論文では、ナノ CMM マイクロプローブの開発を目的とし、光放射圧マイクロプローブを提案する。レーザトラップ技術によって捕捉された直径 $8\mu\text{m}$ のシリカ微粒子は、表面位置検出のセンサとして機能する。微細なプローブ球が測定面近傍で受ける現象を実験により検証し、本プローブを用いた位置検出の原理を明確にした。さらに、プローブの表面位置検出特性を向上するため、測定面表面の位置および法線方向が同時測定可能な 2 次元振動プローブの基本原則を提案し、その有効性を評価した。主な成果を要約すると以下の通りである。

- (1) 捕捉光源にラジアル偏光を用いることで、プローブ球表面の反射率の低減および輪帯ビームによる散乱力の低下を実現した。その結果、直径 $8\mu\text{m}$ のシリカ微粒子を捕捉するトラップ効率が 2.5 倍に向上し、プローブの作動距離を 0.3mm から 3.4mm まで拡大できた。
- (2) レーザトラップ技術によって捕捉されたシリカ微粒子を数百 nm の振幅で振動させ、測定面に接近させると、周辺空気の圧縮・膨張によるダンピング効果により、プローブ球の振動は減衰する。この現象を利用した位置検出の分解能は 20nm、繰返し精度は 14nm であることを示した。
- (3) プローブの光軸に対して水平な平面の位置検出を行う場合、測定面からの反射光と捕捉用光源が干渉し、定在波が発生する。この定在波によってプローブのばね定数に変動することを明らかにし、プローブ振動の励振周波数を共振周波数から 800Hz 程度低くすることで、この影響を低減でき、繰返し測定実験によって 64nm の繰返し精度を示した。
- (4) ダンピング効果の方向異方性を利用し、水平方向に円軌道を持たせた 2 次元振動プローブを用いて測定面の位置と法線方向の同時検出を行う手法を提案した。位置検出分解能は 39nm、法線方向の測定精度は $\pm 2^\circ$ であることを示した。

以上のように、本論文は、ナノ CMM 用マイクロプローブとして、レーザトラッピング技術を用いた光放射圧プローブを提案した。プローブ仕様はプローブ直径 $8\mu\text{m}$ および位置検出分解能 20nm を有し、また位置と同時に測定面法線方向の測定が可能であることを示した。その成果は、ナノ CMM のプローブとして高い有効性を示すものであり、マイクロ部品の 3 次元形状計測・評価において、精密工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。