

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06082

研究課題名(和文) 機械加工面用オンマシンナノプロファイラデバイスの開発

研究課題名(英文) Development of a profiler device for on-machine measurement of machined planer surface

研究代表者

清水 浩貴 (Shimizu, Hiroki)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50323043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：機械加工により創生される平面形状をオンマシン測定するためには、複数の変位センサを用いる多点法で加工機の運動誤差を除去する必要がある。本研究課題では、狭ピッチかつ高精度な多点法形状計測を低コストで実現するため、5ないし10のカンチレバー式変位計を一体構造として作りこんだMEMSデバイスを提案・設計し、製作プロセスの検討を行った。ひずみ検出部に圧電体であるチタン酸バリウムを採用したデバイスを試作したところ、変位に応じた電荷出力を得ることができ、試作デバイスが変位検出能を有することを確認した。また、多点法形状計測法の誤差低減法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高精度平面をつくることは機械産業の基盤技術であり、そのためには高精度オンマシン計測が不可欠である。しかし、これを実現する多点法形状計測法は複数の高精度センサを要することや、セッティング上の困難さから広く実用化されるに至っていない。これに対し、本研究課題で提案したデバイスは簡便に高精度測定ができる可能性を有し、かつ、市販のセンサの組み合わせでは実現不可能な狭ピッチ測定も可能となる。このデバイスと、提案した誤差低減法をさらに発展させることにより、理論的な検討が先行していた多点法形状計測が実用に近づくことが学術的・社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：In order to perform on-machine profile measurement of a machined planar surface, it is necessary to separate the motion error of the stage of a machine tool by a multi-point method using multiple displacement sensors. In this research project, a MEMS device in which 5 or 10 cantilever displacement sensors are integrated monolithically was proposed and designed, and the device realizes multi-point shape measurement with narrow pitch and high accuracy at low cost. The manufacturing process was examined and a device using a piezoelectric material, barium titanate, in the strain sensing part was prototyped. It was confirmed that a charge output corresponding to displacement could be obtained, and the prototype device had displacement detection ability. In addition, error reduction methods for the multipoint profile measurement methods were also proposed.

研究分野：計測工学

キーワード：走査形状測定 運動誤差測定 多点法形状計測 MEMS 真直度測定 平面度測定 オンマシン測定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

各種工作機械の案内面や、形状計測の基準面として利用される高精度平面を製作するには、製作過程での形状測定とその結果をフィードバックしての修正加工の繰り返しが必要となる。

平面の形状計測法計として、干渉計測、粗さ計の測定範囲を拡張したプロファイラ、三次元座標測定器、直定規を用いた比較測定等があるが、いずれも物理基準やステージの精度に頼っており、過酷な加工現場環境でのオンマシン測定には不向きである。また、機械加工面は時にツールマークが残った粗面であることなどから鏡面を前提とした測定は適用できず、さらに加工液が残留した状況の様な、多くの精密計測法が適用困難な状況での測定も求められる。

機械加工面のオンマシン計測に対応できる技術として、精密変位センサを走査することによる形状測定法がある。なかでも、複数のセンサの出力から演算することによりステージの運動誤差を除去して形状を求めることのできる多点法形状計測法は、加工機のステージをそのまま利用することができ、フィードバック加工のためのオンマシン測定に適している。

一方、多点法形状測定法は高分解能なセンサを等間隔に複数並べる必要があることから、センサの物理寸法より狭い間隔(例えば 5mm ピッチ以下)での測定が不可能、センサアライメントから誤差を生ずる、高コスト、という大きな問題を抱えており、機械加工面の高精度オンマシン計測法として広く実用化されるに至っていない。

これらの問題を克服するため、代表者は複数のカンチレバー式変位センサを一体構造とする機械加工面測定に適した Micro Electro Mechanical System (MEMS) デバイスを提案し、その実現に向け基礎的な研究を実施してきた。

本研究課題はこの新たな計測デバイスを実用に近づけるものである。

2. 研究の目的

本研究は機械加工平面のプロファイル、特に長波長のうねりをオンマシン計測可能な 3 点法真直度測定用および、5 点法平面形状測定用デバイスを開発するものであり、次の 3 つを目標とした。

(1) 機械加工面を測定するため、開発するセンサは MEMS デバイスとしては大型となり、特に探針の製作過程では 8 時間から 12 時間にもおよぶ長時間のエッチングを要する。これに起因する回路の損傷や、寸法精度低下が発生していた。そこで、安定的な加工プロセスを開発し、測定精度に影響するデバイスの寸法精度を改善する。

(2) 高い計測分解能とノイズ耐性の実現のために、変位と比例して発生する歪の検出感度を向上する。構造面の検討と、材料面の検討の 2 面からの検討をすすめ、センサ出力を向上させる。

(3) 正方配置 4 点法による平面形状測定におけるゼロ点誤差除去法の実証を行う。多点法形状計測においては各センサのゼロ点位置のずれが形状測定結果に影響し、2 次曲線状の誤差が XY 2 軸方向に生ずる問題がある。この見かけ上の誤差の累積が計算経路により異なる事を逆に利用し、ゼロ点調整誤差を特定して除去する手法の有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1) エッチング時の回路の損傷への対処として、配線材料の見直し、および、回路保護に用いる材料と方法の見直しで対応する。また、長時間エッチングによる探針高さのばらつきに対しては Silicon-on-Insulator (SOI) ウエハを導入し、エッチングの停止位置を精密にコントロールすることで寸法精度を確保した高精度なデバイスを製作する。

(2) 構造的にカンチレバー式変位計の感度を高める方法として、3D CAD での有限要素法解析により検討した結果に基づきデバイスを製作する。さらに、ひずみ検出部に圧電材料であるチタン酸バリウムを採用し、それに合わせて構造およびプロセスの再設計、加工条件出しを行う。

(3) 4 つの変位センサを正方配置し、ラスタスキャンを行うことで平面形状を測定する方法について、数値シミュレーション結果にもとづき実証実験を行う。市販の静電容量型センサと 2 軸ステージを用いて平面形状測定のための実験系を組み、4 つのセンサの原点高さずれ(ゼロ点調整誤差)に起因する形状測定誤差を除去することが可能であるかの検証を実施する。

4. 研究成果

(1) 探針製作時や外形打ち抜き時の配線及び素子損傷の問題に対処した。目標とするデバイス仕様では探針高さが 250 μm あり、その製作に長時間の結晶異方性エッチングを要する。この際、先に製作した配線やピエゾ抵抗体が損傷する問題に対し、配線に用いる金属を薬剤耐性の高い金/クロム配線に変更するとともに、ピエゾ抵抗体部にシリコン窒化膜を用いた保護マスクを積むプロセスで対応し、製作上の問題を解決した。

(2) SOI ウエハを導入し、計測デバイスとして重要となる寸法精度の改善を行った。中間層厚さ 0.7 μm の SOI ウエハを用いたところエッチング停止深さをコントロールでき、探針高さのばら

つきを低減できることを確認した。

(3) センサ出力の向上を目的とし、カンチレバー根本のひずみ検出部に圧電材料であるチタン酸バリウムを採用したデバイスを試作した。圧電材料では電極配置を上下から挟む構造に変更する必要があるため、従前の構造を根本的に見直し、それに合わせたプロセス設計を行った。RFスパッタでのチタン酸バリウムの積層と、2種類の王水と塩酸でのエッチングについて加工条件出しを先行して行い、本製作プロセスではエッチングに塩酸を採用するのが適当であることを確認した。

これに基づき、 piezo 圧電体であるチタン酸バリウムをひずみ検出部に採用したデバイスを製作した(図1)。製作したデバイスを自作の試験装置(図2)により評価した結果、カンチレバー先端への周期変位入力に対応した電荷出力が得られ、製作したデバイスが変位検出能を持つことを確認した。

(4) 多数の繰り返し構造を作りこむことが容易な MEMS デバイスの特性を利用し、10 点同時計測デバイスの実現可能性とそのデータ処理についての検討を行った。このデバイスの有効性を検証するため、1 次元断面形状プロファイルの長ピッチ短ピッチ複合計測法についてシミュレーションを行った。この手法ではプローブ間隔ごとにデータを取得する走査形状測定を行って得た 10 点の同時変位計測結果のうち、両端プローブでのデータを長ピッチ 2 点法データとして扱い、測定領域全体の形状を少ないデータ接続数で表現する。続いて、同じデータセットに含まれる 10 点のプローブ全てでの同時計測結果を、9 組の隣接する短ピッチ 2 点法データ群として扱い、冗長度を利用して平均化したものを短ピッチデータとする。この短ピッチデータを長ピッチデータで拘束することにより、1 回の走査測定で、高い横分解能と、偶然誤差の累積の影響を低減した全体形状測定を同時に実現しうることを明らかにした。

(5) 10 点同時計測デバイスを用いた計測法におけるデータ接続法の検討を進め、データ接続の際のオーバーラップ点数を適切に選ぶことで最終的な累積誤差を減らす最適条件があることを示した。オーバーラップ数を 5 点程度とすることで、データ接続誤差と偶然誤差累積のバランスが取れ、総合的に誤差が最小となることをシミュレーションにより確認した。

(6) 製作した実験系にて正方配置 4 点法平面形状測定におけるゼロ点調整誤差低減法を検証したところ、精密な原点位置合わせを必要とせず、演算のみによりゼロ点誤差を効果的に除去できることを実験的に確認した。

(7) 正方配置 4 点法平面形状測定におけるゼロ点調整誤差低減法を発展させ、対角角度測定を導入することで精度をさらに向上する手法を提案した。ステージの姿勢誤差を無視できない場合に対角方向の角度測定を加えることでさらに誤差を低減できることを数値シミュレーションにより示し、手法の有効性を確認した。

本研究を通し、機械加工面形状の測定に適した MEMS デバイスの実現可能性、ならびに新たな多点法計測の原理と誤差低減法の基本原理を示すことができた。これらを発展させることでオンマシン加工計測の精度向上に寄与することができる。



図 1 ピエゾ圧電体を採用した形状計測デバイス

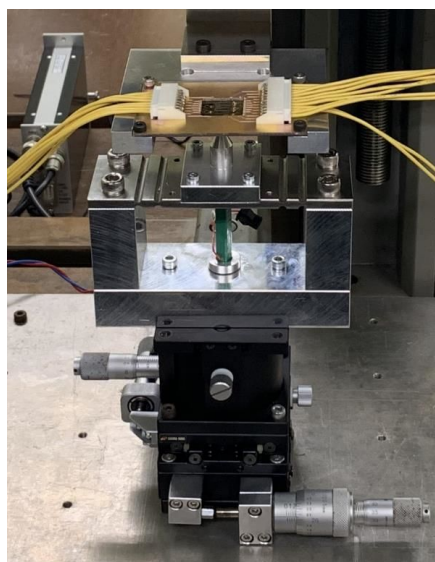


図 2 デバイス評価試験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimizu H., Yamashita R., Hashiguchi T., Miyata T., Tamaru Y.	4. 巻 12
2. 論文標題 Square layout four-point method for two-dimensional profile measurement and self-calibration method of zero-adjustment error	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 707-713
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2018.p0707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiroki Shimizu, Shoichiro Mizukami, Makoto Manabe, Yuuma Tamaru
2. 発表標題 Error Evaluation of Straightness Measurement Using a MEMS Device Integrating 10 Cantilever Displacement Sensors
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Murayama, Y. Tamaru, H. Shimizu
2. 発表標題 High sensitivity MEMS displacement sensor device for planar shape measurement by deposition of piezoelectric materials
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水上翔一郎
2. 発表標題 MEMS 技術を応用した多点法走査形状測定用センサデバイスの開発（第8報）-10点同時測定による誤差累積の影響低減-
3. 学会等名 精密工学会2019年度春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki SHIMIZU, Ryouusuke YAMASHITA, Takuya HASHIGUCHI, Tasuku MIYATA
2. 発表標題 A novel compensation method of zero-adjustment error in flatness measurement using serial four-point method
3. 学会等名 The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	田丸 雄摩 (Tamaru Yuuma) (30284590)	九州工業大学・大学院工学研究院・助教 (17104)	