

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420057

研究課題名(和文) 機械平面形状計測のための多点変位同時測定デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of a form measuring device for machined planar surface by multi point method

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：機械加工平面の高精度オンマシン形状計測を目的とした3点ないし5点の変位を同時計測可能なマルチセンサデバイスを設計した。このデバイスを実現するために必要となる大型MEMSデバイスの製作プロセスを開発し、目的の機能を達成するデバイスを試作した。多数の真直形状測定データを繋ぎ合わせて平面形状を再現する方法を提案し、デバイスのセンサ配置にあわせたデータ処理プログラムを作成した。さらにこの平面形状測定法の誤差特性をモンテカルロシミュレーションにより明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Multi sensor devices which measure displacement of three of five points simultaneously were designed for realizing on-machine measurement of machined planar surface with high accuracy. A total process was developed to fabricate this large scale micro electro mechanical systems (MEMS) device. By using this process, prototypes of proposed devices were manufactured. In addition, a data processing code for reconstructing a planar shape by connecting straightness data acquired by a multi sensor device was programmed. Furthermore, property of accumulated error in a planar form measurement was calculated by Monte Carlo method.

研究分野：計測工学

キーワード：形状測定 平面度 真直度 MEMS 多点法

## 1. 研究開始当初の背景

高精度機械加工平面は、各種工作機械の運動基準面や形状計測の基準面として利用されることから、その製作技術と、それに繋がる評価計測技術は常に精度の向上や汎用性の拡大を求められている。

平面の計測技術としては干渉計測によりナノメートルレベルでの超高精度計測が既の実現しているが、その適用サイズやセットアップ上の制約から、加工計測の面では汎用性に欠ける。直定規等ハードウェア基準を利用する方法もあるが、重力によるたわみや、設置時・環境変化による変形等が生じ、現場測定やオンマシン測定で高精度を維持するのは容易ではない。

オンマシン測定に適し、精度と汎用性を両立する技術として、複数の変位センサを組とし、測定対象面上で走査したデータから真直度を求める多点法走査形状測定法が開発されてきた。この手法では複数のセンサの出力をもとに演算を行うことで基準を用いることなく走査系の運動誤差を除去し、対象形状の真直度を計測できる。一方、複数の高精度センサを高い位置精度で配置する必要があり、一般的な計測方法に比べデータ処理と誤差の解析が複雑になることが実用上の障害となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は複数のセンサを一体構造とした機械加工面形状測定用 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) デバイスを開発するとともに、データ処理の面からも多点法形状計測の実用上の問題の解決を目指すものである。

これまでの研究で開発してきた真直度形状測定用の3点変位同時測定デバイス(以下、3点法デバイス)、ならびに、新たに開発する平面形状測定用5点変位同時測定デバイス(以下、5点法デバイス)によるオンマシン計測を最終目標とし、本研究課題では以下を目的とした。

### (1) 機械加工面計測用大型 MEMS 構造体製作技術の確立

製作している機械加工面計測用デバイスは、一般の MEMS デバイスに比べ凹凸と寸法が極端に大きく(すなわちエッチング体積が大きく)、設計や加工は小型のデバイスを単純にスケールアップしただけでは問題が生じる。そこで、大型 MEMS デバイス製作法の確立を目指す。

### (2) 平面形状計測に適した5点法センサデバイス設計・試作

平面形状測定のためには3点法真直度測定

に加え、2点の隣接ライン間関連情報取得用センサの追加を要することをこれまでの研究により明らかにしたが、カンチレバー式変位計を単純に追加するだけでは全体構造が大きくなりすぎる問題が生ずる。そこで、構造を見直しコンパクトな5点法デバイスの設計・試作を行う。

### (3) 5点法デバイスにあわせた平面形状測定用プログラムの開発および平面形状測定時の誤差解析

3点法真直度測定結果はその原理上複数の測定結果間に相関が無く、平面形状の再現のために各ラインの真直形状情報を正確に結合するための関連付けが必要である。本課題においては、(2)の新たなデバイスの測定点配置に合わせた平面形状再現プログラムを作成する。

さらに、多点法による平面形状測定法での偶然誤差の影響の解析を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 探針製作、回路ならびに外形製作を統合するプロセス設計に基づく試作

提案するデバイスの製法としてこれまで別々に検討していた“探針製作”、“回路製作”、“外形製作”の各プロセスを統合するプロセスを設計する。

プロセスを統合するにあたっての従来の問題は、長時間エッチングのため探針製作後のエッチング面に微小な欠陥が残り、その後の回路製作に困難をきたすことである。試薬メーカーの協力を得てアルミ配線の溶解を防ぎつつエッチングが可能な特殊配合のエッチング液を採用すること、並びに加工プロセスの順序の大幅な見直しも含め、デバイス全体の製作プロセスを開発する。

### (2) 5点法による平面測定用デバイスの設計

5点法による平面形状測定には変位センサ5つを密に配置する必要がある。この目的に合致した構造として、3本の真直度測定センサに、2本のライン間関連情報取得用センサを互い違いに対抗して配置することで全体のサイズを抑えた5点法用デバイスを設計・試作する。設計にあたり、有限要素法解析によりカンチレバーの幅、長さ等を決定するほか、温度補償用ダミーゲージに伝わる応力を減少させる設計を検討する。

### (3) 平面度測定プログラムおよび測定シミュレーションソフトウェアの作成

隣接測定ライン間の測定点位置が半ピッチずつずれる新たな5点法デバイスの測定点配置では、格子点上に測定点が配置されるブ

プログラムが使えず、データの重ね合わせに異なる漸化式処理が必要となる。そこで、センサ配置に適合する平面形状処理プログラムを作成する。

さらに、5点法および正方配置4点法による平面形状測定時の偶然誤差の影響をモンテカルロシミュレーションにより明らかにする。

(4) デバイス評価用試験装置の製作  
製作したデバイス評価のための磨耗試験装置を既存のステージと板バネを用いた低荷重沿測定機構の組み合わせにより実現する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 機械加工面計測用大型 MEMS 構造体製作プロセスの開発

これまで別々に行ってきた3つの加工プロセス、すなわち計測デバイスの探針製作・変位検出回路製作・外形製作を統合するプロセスの確立をめざして研究を行った。当初はアルミ配線を溶解しない特殊配合の薬液を用いての加工を試みたが、長時間のエッチングを要する当デバイスの製作には適合せず、回路が溶解してしまう結果となった。この問題に対処するため当初の予定を変更し、図1に示すプロセス設計と実験条件出しを行った。

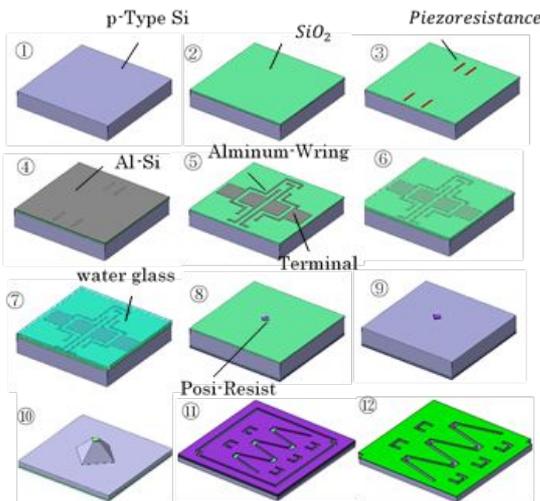


図1 デバイス製作プロセス概略図

各プロセスの詳細は以下のとおりである。P型、結晶面方位(100)のシリコンウェハを洗浄。

P-CVDにてシリコン酸化膜を両面に500nm堆積。

イオン注入によりn型Siを形成しピエゾ抵抗体を作成。

スパッタリングにて、回路形成用Al-Siを1μm堆積。

混酸エッチングにて回路を形成。

形成した回路上に酸化膜を両面に800nm堆

積。

回路上に水ガラスとSiO<sub>2</sub>を5層交互に積層し、回路面を保護。

裏面にリソグラフィを行い、ウェットエッチング時の探針部保護マスクを形成。

不要な酸化膜をBHFエッチングにて除去。TMAH溶液にてウェットエッチング。

外形パターンをフォトリソグラフィにて作成。

D-RIEにてデバイス外形に沿ってエッチングを行う。

デバイス製作では、まずひずみ検出部と回路を製作した後、その後のプロセスで回路が溶解することを防ぐために水ガラス層とシリコン酸化膜層を複数塗り重ねた保護膜を形成する。この保護層を3層、5層とした場合、およびHF処理を施し水ガラスのみ5層積層する方法の塗布の均一性と保護性能の評価を行い、3点法用デバイスでは5層の保護層の塗り重ねを用いることで十分な保護効果を得られることを示した。その結果、デバイス製作の目的を立てることができた。

さらに、長時間エッチング時のエッチング面の荒れを改善する方法として、通常のエッチング液(主エッチング剤(TMAH)、イソプロピルアルコール(IPA)、水の混合液)とは別に、IPAを配合しない別組成の薬液を用意し、それらを交互に用いることで表面荒れの少ない加工を行えることを新たに見出した。それに加え、表面荒れが薬液中の気泡の流れからも生じていることを確認し、それに対処するための保持治具を製作した。

##### (2) 5点法デバイスの開発

5つの変位計をコンパクトに配置するため、図2に示す様な、3本の真直度測定用カンチレバー変位計に対向して、2本のライン間相関情報取得用のカンチレバー変位計を配置する構造を提案した。3次元CAD上での有限要素法解析により各部寸法を決定し、ダミーゲージ周りには応力緩和スリットを設けた。

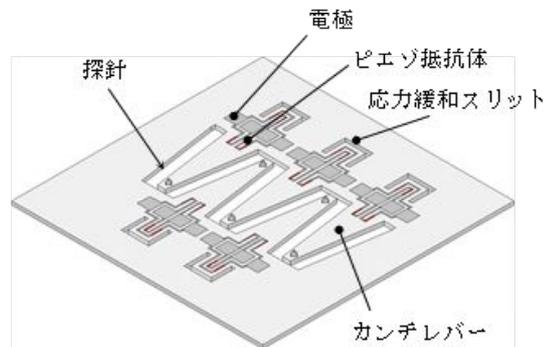


図2 5点法デバイス概略図

これに(1)の製作プロセスを適用し、製作したセンサデバイスが図3に示す変位検出能を有することを確認した。

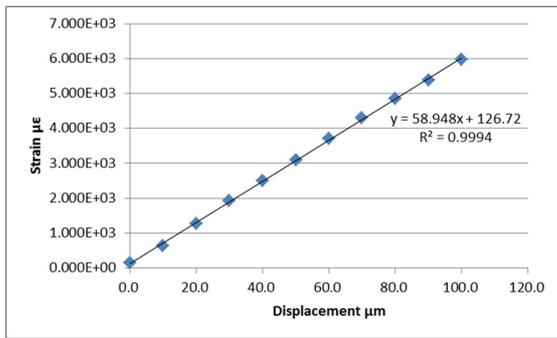


図3 センサデバイス 変位 出力特性

(3) 平面度測定プログラムおよび測定シミュレーションソフトウェアの作成

3点法真直度測定における各測定データのばらつき、およびゼロ点調整誤差が累積する問題をモンテカルロシミュレーションにより検討した。この結果をもとに、基準測定ピッチの整数倍の長ピッチ測定を併用した3点法計測法について検討し、誤差累積を軽減できることを示した。また、長ピッチの選択にあたっては基準測定ピッチでの測定回数の平方根に近い値を基準測定ピッチに乗じた長さを採用することが誤差の低減効果が高いことをシミュレーションにより示した。図4に3600mmの測定対象物を100mmピッチで標準偏差0.1μmの偶然誤差を持つセンサで測定し、3点法を適用した際の各位置での累積誤差を示す。長ピッチ測定の長さを600mmと適切に選ぶことで誤差が低減できることが示された。

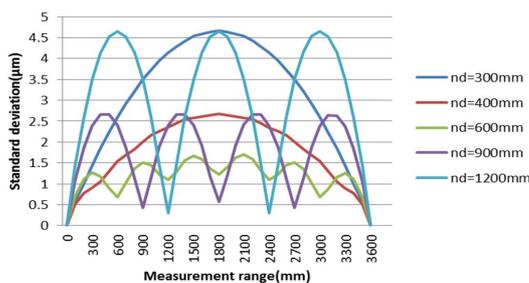


図4 長ピッチ長さ選択による誤差低減効果

(4) デバイス評価用試験装置の製作

デバイス評価用装置については、製作中のデバイスを模擬した変位センサの試験評価が可能な装置を製作し、それに合わせて組んだ真直形状測定用プログラムと合わせることで真直形状測定が可能であることを確認した。

また、試作デバイスの耐久性評価、特に探針摩耗の程度を検討するため、板バネを用いた微小荷重検出部を持つ摩耗耐久試験を製作した。この装置を用いてシリコンウエハの非研磨面に対するシリコン探針の磨耗試験

を行ったところ、デバイスを100μm押し込んだ状態で160m走査すると23~53μm摩耗するという結果を得た。

(5) 構造変更による高感度化の検討

カンチレバー根元部に意図的に応力集中部をつくり感度の向上が可能かを有限要素法解析により検討した。カンチレバー根元近くに切り抜き構造をつくり、その横に配置した検出部に応力を集中させることで、約4.5倍の感度向上が見込めることを示した。

また、カンチレバーに変位が与えられた際、隣接するカンチレバーの根元部に応力の伝播が生じ、最初の試作デバイスでは約20%と無視できないクロストークが発生する問題も判明した。この問題の解消のため有限要素法解析を行い、追加の切欠きをカンチレバー間のベース部に配置することでクロストークを1%以下に低減できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 9 件)

山下亮祐, 清水浩貴, 田丸雄摩, 橋口拓也, 石橋和也, 角度補正付き逐次多点法を用いた走査型平面形状測定(第3報)-平面測定のためのゼロ点調整誤差除去法の提案-, 2016年度精密工学会春季大会 学術講演会, 2016年03月16日, 東京理科大学野田キャンパス(千葉県野田市)

Hiroki Shimizu, Souichiro Komatsu, Yuuma Tamaru, Redesign of cantilever displacement sensor to improve sensitivity and channel separation, the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015年10月19日, Kyoto Research Park (京都府京都市)

Hiroki Shimizu, Takahiro Akiyoshi, Shinya Yanagihara, Yuuma Tamaru, Akiyoshi Baba, Design of a MEMS device for scanning profile measurement with three cantilever displacement sensors, 12th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2015年9月24日, Taipei(Taiwan)

清水浩貴, 松本航, 田丸雄摩, MEMS技術を応用した多点法走査型形状測定用センサデバイスの開発(第7報)-デバイス探針の摩耗評価装置の製作-, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015年9月4日, 東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)

卯田将太, 清水浩貴, 田丸雄摩, 角度補正付き逐次多点法を用いた走査型平面形

状測定(第2報)ー長ピッチ測定を援用した2次誤差軽減法の検討ー, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015年3月19日, 東洋大学白山キャンパス(東京都文京区)

菊地洋輝, 清水浩貴, 田丸雄摩, 坂本憲児, 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6報)ー平面測定用デバイスの製作ー, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015年3月17日, 東洋大学白山キャンパス(東京都文京区)

菊地洋輝, 清水浩貴, 田丸雄摩, 坂本憲児, MEMS技術を応用した多点法走査型形状測定用センサデバイスの開発(第5報)ー平面測定用デバイスの設計と構造解析ー, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014年9月16日, 鳥取大学鳥取キャンパス(鳥取県鳥取市)

残華智仁, 清水浩貴, 田丸雄摩, 坂本憲児, MEMS技術を応用した多点法走査形状測定用マルチカンチレバーの開発(第4報)ー表面荒れを抑えた探針製作法ー, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014年3月19日, 東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

藤田豊栄, 清水浩貴, 田丸雄摩, 角度補正付き逐次多点法を用いた走査型平面形状測定(第1報)ー測定原理の検討と基礎的検証ー, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014年3月18日, 東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

田丸 雄摩 (TAMARU YUUMA)  
九州工業大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 30284590

### (3) 連携研究者

坂本憲児 (SAKAMOTO KENJI)  
九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・准教授  
研究者番号: 10379290

### (4) 研究協力者

竹内 修三 (TAKEUCHI SHUUZOU)  
北九州学術推進機構 (FAIS)・半導体技術センター・主任研究員