

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249006

研究課題名(和文)次世代三次元形状の高精度化のための三次元計測における不確かさ推定手法の実用化

研究課題名(英文) Practical application of uncertainty estimation method in three dimensional measurement for high precision of next generation three dimensional shape

研究代表者

高増 潔 (Takamasu, Kiyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：70154896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,000,000円

研究成果の概要(和文)：次世代ものづくりにおいて、製作する部品の形状精度を向上するためには、ナノスケールでの三次元形状測定が不可欠となる。

本研究では、誤差分離や自己校正を利用した不確かさ推定理論の体系化を行った。これを三次元測定機および半導体計測装置の不確かさ解析へ適用し、実験的な実証により有効性を確認した。さらに、光学的三次元測定システムに不確かさ推定手法を適用し、自己校正によりサブナノメートルの不確かさで形状測定が可能なることを実験的に実証した。

以上のように、精密計測における次世代三次元形状の高精度化のために、不確かさ推定手法を実用化できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノスケールの精度を持つ三次元形状計測における測定の不確かさの評価は、次世代のものづくりの高度化に不可欠である。学術的には、本研究で開発した形状測定装置、自己校正手法、不確かさ推定手法は、他の測定システムへの適用が可能で波及効果大きい。社会的には、日本のものづくりの優位性を活かしながら製作する部品の形状精度をナノスケール化することで、機械部品、半導体、光素子に高付加価値な機能を付与するナノスケールものづくりへの展開が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In the next-generation manufacturing, in order to improve the shape accuracy of parts to be manufactured, three-dimensional shape measurement at nanoscale is indispensable.

In this research, we systematized the uncertainty estimation theory using error separation and self-calibration. This was applied to the uncertainty analysis of a three-dimensional measuring machine and a semiconductor measuring device, and the effectiveness was confirmed by experimental verification. Furthermore, the uncertainty estimation method was applied to the optical three-dimensional measurement system, and it was experimentally demonstrated that shape measurement can be performed with sub-nanometer uncertainty by self-calibration.

As described above, the uncertainty estimation method has been put to practical use to improve the accuracy of the next generation three-dimensional shape in precision measurement.

研究分野：精密測定，三次元計測，ナノメートル計測

キーワード：座標計測 ナノメートル計測 光計測 三次元形状測定 不確かさ推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノスケールの精度を持つ三次元形状計測における測定の不確かさの評価は、国際的に非常に重要になってきている。例えば、ナノスケールの半導体線幅は、半導体産業における測定機器の基準となる。しかし、ナノスケール形状の精度は値付けをする測定手法の不確かさだけでなく、校正環境の影響、標準の幾何学的な形状の影響、測定機を含めたデータ処理の不確かさなどを総合的に評価する必要がある。以下のような視野に立って不確かさ体系化を行って来たこと独創的であり、これを実用化するための研究が行える。

- 複雑な三次元形状が増加したが、走査顕微鏡、光干渉計測、ナノ三次元測定機などの不確かさ評価が十分行われていない。
- 三次元計測は、複雑な測定機で高度なデータ処理を行うため、不確かさの要因として前述したような多くの要素を考慮しなくてはならない。
- 次世代の三次元形状の高精度化のために、不確かさ推定手法を実用化する。

2. 研究の目的

日本のものづくりの優位性を活かしながら次世代のものづくりの高度化を実現するには、製作する部品の形状精度をナノスケール化することで、機械部品、半導体、光素子に高付加価値な機能を付与するナノスケールものづくりが不可欠となる。ナノスケールものづくりは、新しい付加価値の創出であり、これは形状精度のナノスケール化によって付与される製品機能の飛躍的な高度化により与えられ、幾何特性のナノスケール化を実現するナノ三次元計測がその原動力となる。ナノ三次元計測では、高精度機械部品、半導体、光素子を計測するために、誤差分離、標準、不確かさ推定、計測機器の自己校正を体系化することが必要である。

ナノ計測では、誤差分離や自己校正を利用した不確かさ推定理論の体系化はこれまでの研究により高度化されている。これを光ナノ三次元計測へ適用する実験的な実証により実用化を行う。ナノ標準では、ナノ三次元計測に必要なピッチ、段差、線幅などの標準を開発し、その校正を行う測定機器を含めた不確かさ評価を行う。さらに2つの成果を、ナノスケールものづくりの現場に生かすための実用化のための研究を行う。

3. 研究の方法

次世代のものづくりにおける三次元計測の不確かさ体系化およびその実用化のために、以下に示す4つの研究課題に対して研究を行い、成果を融合する。

三次元計測の不確かさの理論およびシミュレーションの実施試験

角度測定による三次元形状計測の不確かさ推定の実証実験

ナノ標準の開発と不確かさ評価

産業界でのニーズ、問題点の抽出と不確かさ推定の実証

このうち、は連携研究者である産業技術総合研究所のグループが実施し、について共同研究をベースに研究協力者がそれぞれ実施する。本研究では、とについて東京大学のグループを中心に実施し、最終的に成果の融合を行う。

4. 研究成果

(1) 不確かさ推定理論の体系化とシミュレーションソフトウェアの開発と提供

三次元計測における不確かさ推定理論の体系化を行った。図1は理論の構成を示す。まず、標準を利用した測定機の校正作業により、測定機の運動学パラメータの不確かさ(S_p)が推定される。これに対して、測定機および測定対象の不確かさによる測定点の不確かさ(T_i)が求まり、測定戦略を含めた最終的な不確かさ(s_d)が評価される。

この理論体系を実際の三次元計測に適用することを考え、以下の検討を行い、構築した体系に対応するシミュレーションソフトウェアを実際の実験のために提供した。

- 不確かさの要因をモデル化したシミュレーションソフトウェアを構築し、実証実験として、産業技術総合研究所、東京都立産業技術研究センター、東京精密、日立ハイテクノロジーなどのグループに提供した。
- シミュレーションソフトウェアを利用するための、サポートソフトウェアを追加で開発し、利用者が自由に使えるシステムを構築した。
- 特定の測定機器(三次元測定機、半導体測定システム、光学的形状測定機)に対応した、不確かさシミュレーションソフトウェアの開発指針を明らかにした。
- 不確かさを推定するだけでなく、不確かさを小さくするための方法をソフトウェア上でテストできるプラットフォームを作成した。

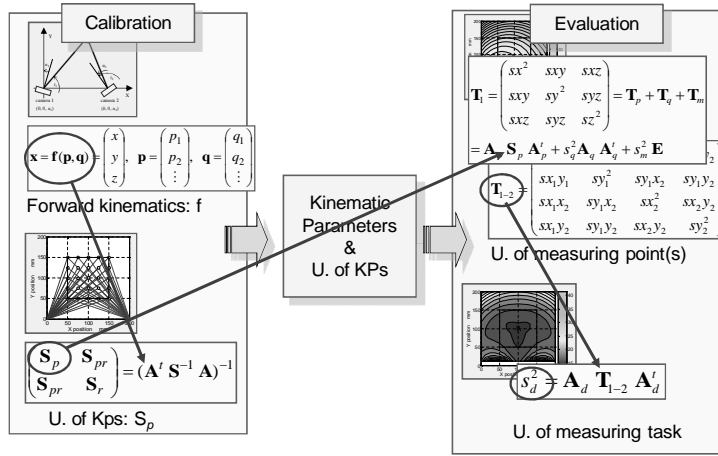


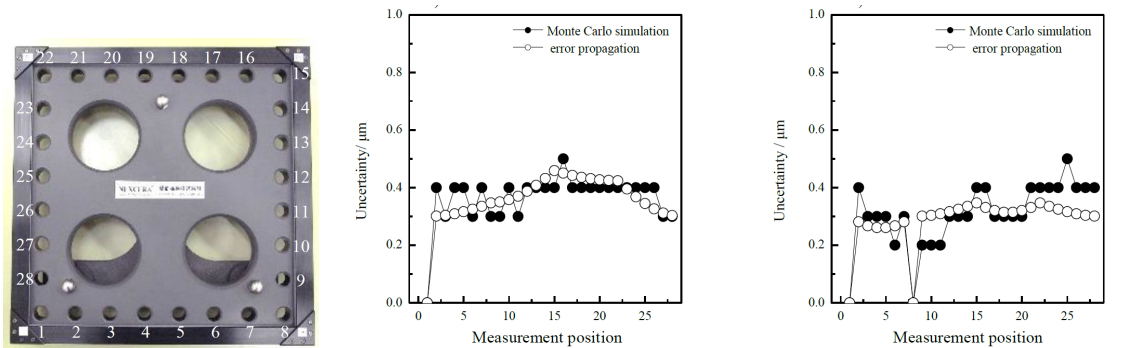
図1 ナノ三次元計測の不確かさ推定の理論体系

(2) 不確かさシミュレーションソフトウェアの実施

不確かさシミュレーションソフトウェアの実施の具体例として、三次元測定機への適用例および半導体構造計測への応用例を示す。

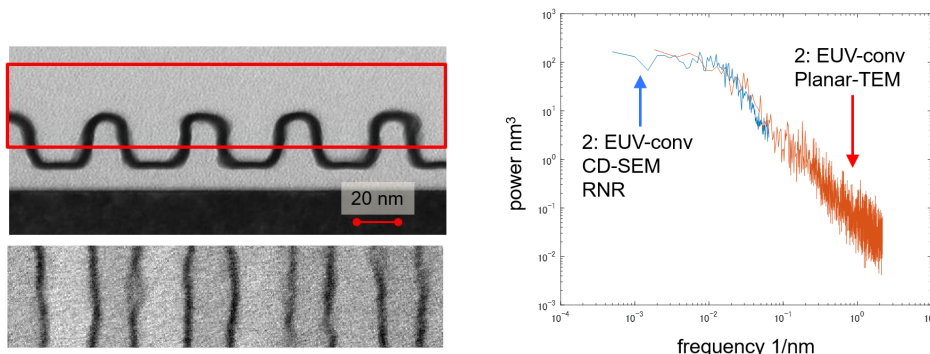
図2は、三次元測定機によるホールプレートの測定に適用した例である。産業技術総合研究所および東京都立産業技術研究センターとの共同研究として実施した。図2(a)で示すホールプレートは、三次元測定機の検査等に利用され、穴の中心座標を高精度に校正する必要がある。図2(b)は、28個のホールの中心座標(X座標, Y座標)の測定における不確かさを、実験とシミュレーションソフトウェアで推定した結果の比較である。不確かさの推定は、高精度で行えることが実証された。

図3は、半導体構造計測に適用した例である。日立ハイテクノロジーズとの共同研究として実施した。図3(a)で示す次世代半導体構造は、線幅が10nm以下である。この測定結果を周波数解析することで不確かさを評価した(図3(b))。サブナノメートルの精度を評価し、有効性を確認できた。



(a) ホールプレート(28個のホール) (b) 実験と推定による不確かさ評価(X座標, Y座標)

図2 三次元測定機によるホールプレートの測定結果と不確かさ推定



(a) 半導体構造の画像 (b) 線幅の周波数解析結果

図3 半導体構造のナノメートル計測と不確かさ推定

(3) 光学的三次元形状測定への不確かさ評価の実施

新しい光学的手法を利用したナノ三次元測定に関して、マルチ角度センサによる三次元測定システムおよび角度測定による三次元測定システムを適用対応として、より高精度な測定と、

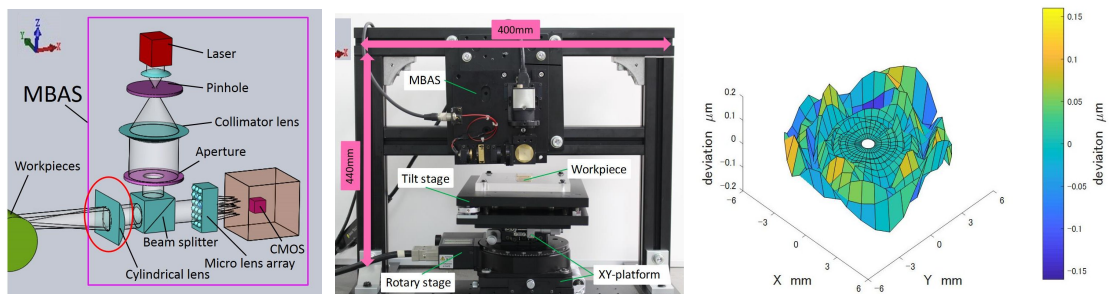
その不確かさの評価手法の実用化を目指した。回転するステージとオートコリメータ（角度センサ）を組み合わせることで、高精度化とステージの誤差の分離、オートコリメータの自律校正を可能にするシステムが構築できた。

これらのシステムを三次元計測の実施例として開発し、理論的な不確かさ推定と合わせて、以下のことを実証した。

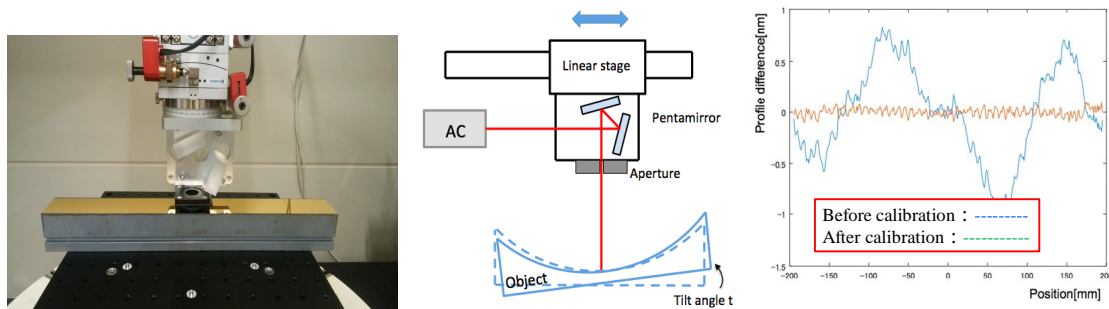
- 三次元形状測定を広い範囲（100 mm 以上）、高精度（高さ分解能 1 nm 以下）で実施するために、不確かさ推定手法を適用した。
- マルチ角度センサに対して、不確かさ推定手法がトップダウン的に適用できることを示した。
- マルチ角度センサおよびオートコリメータの精度評価および自律校正を実施した。
- システム全体の不確かさ評価を理論的および実験的に行い、理論体系を実証した。

図 4(a)は、開発したマルチ角度センサによる測定システムである。このシステムを利用して、回転ステージと形状の誤差分離とその不確かさ評価を行った。図 4(b)は、非球面形状のナノメートル計測結果である。非球面として円筒面を対象として、回転ステージの精度に影響されない高精度形状測定が可能となった。

図 5は、オートコリメータによる光学的平面度測定装置である。産業技術総合研究所との共同研究として実施した。図 5(a)に開発したシステムと自己校正手法の概念を示す。測定物からの反射光の角度を、積分することで形状を計算している。このとき、オートコリメータの系統誤差を補正するために自己校正手法を適用した。図 5(b)に結果を示す。系統誤差が 2 nm から 0.2 nm へ減らすことができ、サブナノメートル精度の計測が実現された。



(a) マルチ角度センサによる測定システム (b) 非球面形状のナノメートル計測結果
図 4 マルチ角度センサによる光学的三次元形状測定システムの開発と不確かさ推定



(a) オートコリメータを利用した測定システム (b) 自己校正による精度向上
図 5 オートコリメータを利用した光学的平面度測定装置と自己校正手法

(4) 研究成果のまとめ

上記のように、次世代三次元形状の高度化のための三次元計測における不確かさ推定手法の体系化が確立できた。さらに、開発した手法を三次元測定機、半導体構造計測、光学的三次元形状測定に適用することにより、実用性を実証でき、実用化のフェーズへ進めることができた。特に、角度計測を利用した形状測定では、ものづくりの現場における過酷な条件における不確かさ推定とその精度向上の体系化および実用化が可能となる。精密計測技術とその不確かさ推定手法を、産業界での適用を行うことで、トレーサビリティを考慮した新しいものづくりの高度化への進展を目指すことが可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

Yuka Miura, Shoichi Nakanishi, Eiichi Higuchi, Kiyoshi Takamasu, Makoto Abe, Osamu Sato: Comparative Evaluation of Estimation of Step Gauge Measurement Uncertainty via Monte Carlo Simulation, Precision Engineering, 査読有, Vol.55, 2019, 390-396 DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.10.007

Agustinus Winarno, Shusei Masuda, Satoru Takahashi, Hirokazu Matsumoto, Kiyoshi

Takamasu: Noncontact method of point-to-point absolute distance measurement using tandem low-coherence interferometry, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol.29, 2018, 025006, 1-8

DOI: 10.1088/1361-6501/aaa16e

Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi, Hiroki Kawada, Masami Ikota: Linewidth roughness of advanced semiconductor features using focused ion beam and planar-transmission electron microscope as reference metrology, Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS, 査読有, Vol.17, No.4, 2018, 41010

DOI: 10.1117/1.JMM.17.4.041010

Chen Meiyun, Takahashi Satoru, Takamasu Kiyoshi: Calibration for the sensitivity of multi-beam angle sensor using cylindrical plano-convex lens, Precision Engineering, 査読有, Vol.46, 2016, 254-262

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.004

Wiroj Sudatham, Hirokazu Matsumoto, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu: Diagonal in space of coordinate measuring machine verification using an optical-comb pulsed interferometer with a ball-lens target, Precision Engineering, 査読有, Vol.43, 2016, 486-492

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.09.017

[学会発表](計 37 件)

Kiyoshi Takamasu: Linewidth and Roughness Measurement of SAOP by Using FIB and Planer-TEM as Reference Metrology, SPIE Advanced Lithography 2019

Winarno Agustinus: Non-contact method of an absolute length measurement between two ball-lenses using a tandem low-coherence interferometer, ISMTII 2017, 2017

Wiroj Sudatham: Absolute precision measurement for space coordinates metrology using an optical-comb pulsed interferometer with a ball lens target, euspen2015, 2015

Taro Onoe: Precision measurement technique for rough surface object using self-beat signals of optical frequency comb, euspen2014, 2014

Meiyun Chen: Measurement of Surface Roundness Using a Multi-Beam Angle Sensor, LMPMI2014, 2014

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 校正装置及び校正方法

発明者: 高増潔, 松本弘一, 丸山 聡

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2017-174111

出願年: 2017 年

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 高橋 哲

ローマ字氏名: (TAKAHASHI, satoru)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 先端科学技術研究センター

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30283724