

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246016

研究課題名(和文) ナノ三次元計測における不確かさ推定手法の体系化

研究課題名(英文) Estimation Method of Unertainty on Nanometer Three Dimensional Measurement

## 研究代表者

高増 潔 (Takamasu, Kiyoshi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70154896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,100,000円

研究成果の概要(和文)： ナノスケールものづくりにおけるナノ三次元計測の不確かさ体系化のために、以下に示す4つの研究を行い、ナノメートル三次元計測における不確かさ推定手法の体系化を行った。

(1) ナノ三次元計測の不確かさの理論では、測定機の運動誤差から伝播により不確かさを推定するソフトウェアを開発し、その有効性を確認した。(2) 光学的ナノ三次元形状計測では、角度センサを利用した非球面計測手法を開発し、その不確かさ推定を行った。(3) ナノ標準の開発では、Si格子をスケールとして利用する半導体構造の三次元形状測定を実施した。(4) 光コムによるパルス干渉計では、パルス干渉計を構築し、三次元座標測定機の精度評価を行った。

研究成果の概要(英文)： We conducted four research tasks shown below for uncertainty systematization of the nanometer three dimensional measurement in nanoscale production system, and systematized the uncertainty estimation technique.

(1) In the theory of the uncertainty of nanometer three dimensional measurement, we developed the software which estimates uncertainty by propagation from the kinematic errors of a measuring machine, and checked the validity of the estimation. (2) In optical nanometer three dimensional form measurement, we developed the aspheric surface measurement technique in which we used the angle sensor, and performed the uncertainty estimation. (3) In the standard development for nanoscale, we carried out three dimensional form measurement of the semiconductor structure of using Si lattice as a scale. (4) In the pulse interferometer by an optical comb, we built the pulse interferometer and performed accuracy evaluation of the coordinate measuring machine.

研究分野：精密測定

キーワード：ナノメートル計測 三次元計測 不確かさ推定 形状測定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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。ピッチ標準(ピッチ 240 nm)は、半導体産業などで測定機器(SEM, AFM など)の基準となる。しかし、ピッチの精度は値付けをする測長AFM(原子間力顕微鏡)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。

(2) 以下のような視野に立って不確かさ体系化を行うことが必要であり、ナノスケールものづくりの高度化を大きく支援することになり、普及効果が大きい。

①複雑なナノ三次元形状が増加したが、SEM(走査顕微鏡)、AFM、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。

②三次元計測は、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。

③ナノスケールでは測定対象の形状偏差が相対的に大きくなり、形状偏差の影響を考慮する必要がある。

④ナノ三次元計測における不確かさを評価することで、ナノスケールものづくりに新しい付加価値の創出を生むことができる。

## 2. 研究の目的

(1) 日本のものでづくりの優位性を活かしながら次世代ものづくりの高度化を実現するには、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。

(2) 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の技術を体系化することが必要である。本研究の概要を示す。

①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と、これを光ナノ三次元計測へ適用する実験的な実証を行う。

②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。

③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証研究を行う。

## 3. 研究の方法

ナノスケールものづくりににおけるナノ三次元計測の不確かさ体系化のために、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。

①ナノ三次元計測の不確かさの理論およびシミュレーション

②光学的ナノ三次元形状計測の基礎実験および評価

③ナノ標準の開発と不確かさ評価

④光コムによるパルス干渉計による測定

(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において、ナノ三次元計測における不確かさ推定理論の体系化を行う。誤差伝播に基づく不確かさ推定理論の構成では、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が求まり、測定戦略を含めた最終的な不確かさが評価される。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、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開発する。

(2) 光学的ナノ三次元形状測定の実験において、新しい光学的手法を利用したナノ三次元測定に関して、角度センサを用いた三次元形状システムの改良を行い、より高精度な測定と、その不確かさの評価手法の確立を目指す。このシステムでは、開発したオートコリメータ(角度センサ)を利用することで、高精度化とステージの誤差の分離、角度センサの自律校正を可能にするシステムが構築できる。このシステムをナノ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を行う。

(3) ナノ標準の評価において、半導体構造のナノメートル三次元計測システムを構築し、トレーサビリティの確保および不確かさ推定方法について検討を行う。標準としてSi格子をスケールとして利用する半導体構造のナノメートル形状を測定する手法およびその不確かさ推定手法を開発する。

(4) ナノメートル形状測定の絶対評価のために、光コムによるパルス干渉計による測定を行う。光コムは、長さのトレーサビリティの特定標準となっているため、光コムによる測定を利用して、トレーサビリティの確保および不確かさの評価を行うための手法を開発する。

## 4. 研究成果

目的および研究方法に示した以下の4つの対象に関して研究を行った。それぞれにおける研究成果について説明する。

(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

① ナノ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。誤差伝播に基づく不確かさ推定理論の構成を行った。

② シミュレーションソフトを、既存の三次元座標測定機のために開発し、測定機の校正作業により得られた測定機の運動学パラメータから、測定結果の不確かさを推定した。

③ 他の三次元座標測定機の結果との比較を行い、作成したソフトウェアの評価を行った。

(2) 光学手法を用いた三次元形状計測および不確かさの推定

① 角度計測を利用した、大型非球面測定システムを開発した。図1に示すシステムでは、角度測定の結果を積分することで、大型非球面をナノメートルオーダーの精度で測定することが可能となった。

② このシステムに対して、不確かさ解析を行った。図2は、不確かさ解析のための不確かさ伝播チャートである。この解析による不確かさと図1のシステムで行った実験による不確かさはよく一致し、不確かさ推定手法の実用性を確認することができた。

③ システムの精度を向上させる手法として、自律校正手法を適用した。図3に示すように、非球面を測定した後、テーブルを傾け、もう一度測定することで、角度センサの自律校正が可能となる。この手法を実施し、測定不確かさを減らすことが可能であった。

④ 以上の理論的な不確かさ推定と、三次元形状計測の実験により、ナノメートルオーダーの不確かさ解析を実施することができ、不確かさ解析手法の体系化への実証を行うことができた。

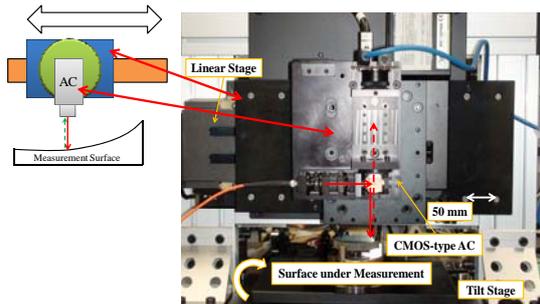


図1 角度計測による大型非球面測定機

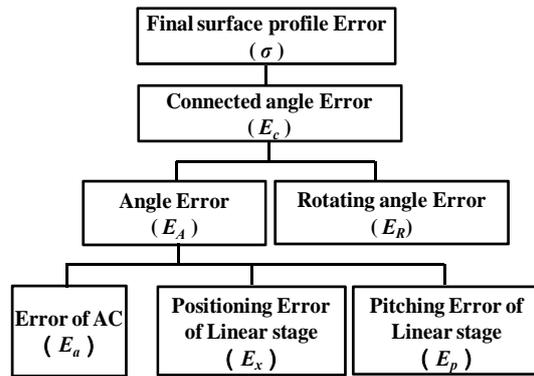


図2 非球面計測の不確かさ解析

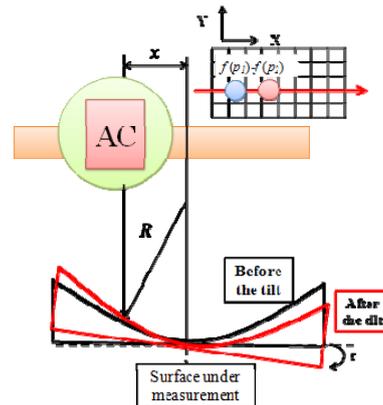


図3 自律校正の手法

(3) 半導体構造を対象としたナノメートル形状測定および不確かさの推定

① 半導体構造のナノメートル形状を測定する手法およびその不確かさ推定手法を開発した。図4(a)はSiのライン構造をTEM(透過電子顕微鏡)で測定した画像である。ほぼ、40 nmの線幅を持つライン構造が測定できている。また、図4(b)の拡大図では、Siの格子構造が観察でき、この格子をスケールとして使うことでトレーサビリティを確保したナノメートル形状測定が可能となった。

② 次世代 finFET 構造の測定を行った。図5は、次世代の半導体である finFET の構造で、線幅は 10 nm オーダである。この形状に対して、Si のライン構造と同様の手法で測定を行った。

③ 線幅の測定に対して、不確かさ評価を行った。図6は不確かさ評価のバジェットシートである。この例では、拡張不確かさ ( $k=3$ ) が 0.21 nm で線幅を計測することができた。

④ 以上のように、ナノメートルオーダーの半導体構造に対して、形状計測を行い、不確かさ推定を行うことができた。

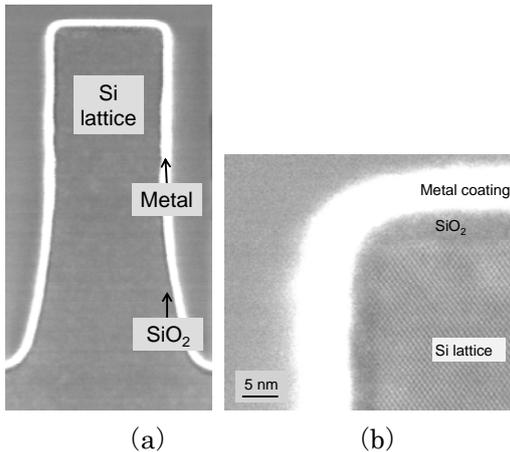


図 4 Si ライン構造の TEM 画像

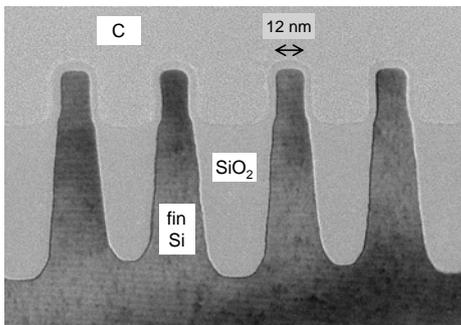


図 5 finFET 半導体構造

| contributors                        | threshold level<br>$S_t$ | random              |                        |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|
|                                     |                          | pixel size<br>$S_p$ | repeatability<br>$S_r$ |
| evaluation                          | $\pm 2.5\%$              | 0.0046 %            |                        |
| standard uncertainty (measured) $u$ | 0.133 nm                 | 0.0233 nm           | 0.00639 nm             |
| expand uncertainty $U(3\sigma)$     |                          | 0.21nm              |                        |

図 6 不確かさ評価

(4) 光コムによる絶対距離計測および不確かさ評価

① ナノメートル形状測定の絶対評価のために、光コムによるパルス干渉計による測定を行った。光コムは、長さのトレーサビリティの特定標準となっているため、光コムによる測定を利用して、トレーサビリティの確保および不確かさの評価が行える。図 7 は、光コムを利用したパルス干渉計の原理である。パルス間隔を利用して、絶対距離計測が可能となる。

② 光コムによるパルス干渉を三次元座標測定機の精度評価に適用した。図 8 は、三次元座標測定機に取り付けたミラーに対して、パルス干渉計により絶対位置を測定している実験である。この手法により、ナノメートルオーダーでの三次元位置測定が可能となった。

③ 光コムによるパルス干渉に対して、不確かさ推定を実施した。パルス干渉では、主に空

気の屈折率の影響が大きい。三次元測定機の精度評価では、 $0.1 \mu\text{m}$  以下の不確かさで測定することが可能であった。

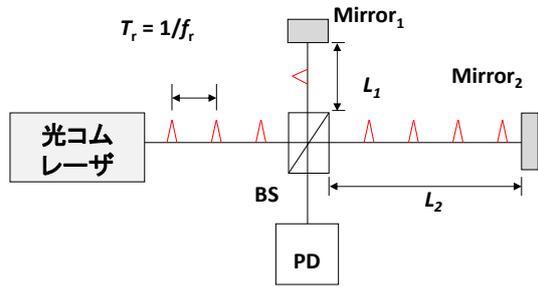


図 7 光コムによるパルス干渉計の原理

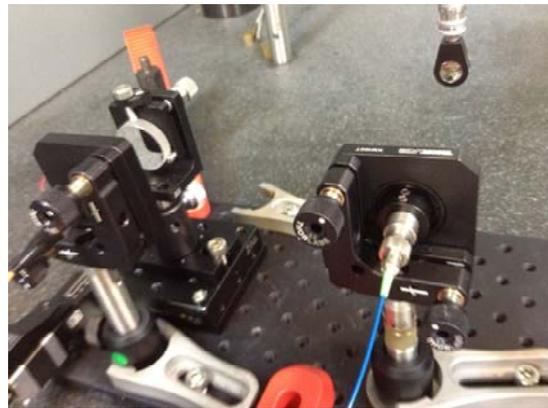


図 8 パルス干渉計を三次元座標測定機に適用した例

(5) 研究成果のまとめ

以上のように、ナノメートル三次元測定における不確かさ推定手法を体系化するための実験を行った。ナノメートル三次元測定における不確かさ推定手法が実際に適用できることを示すことができた。また、推定手法を体系化することにより、実際の産業界で役に立つような計測への適用が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 2 件)

- ① Muzheng Xiao, Tomohiko Takamura, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu: Random error analysis of profile measurement of large aspheric optical surface using scanning deflectometry with rotation stage, Precision Engineering 37 (3), 査読有, 2013, 599-605, DOI:10.1016/j.precisioneng.2013.01.005
- ② R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi, K. Takamasu: Influence of standing wave phase error on super-resolution optical inspection for periodic

microstructures, Meas. Sci. Technol. 23, 査読有, 2012, 054007 1-13, DOI:10.1088/0957-0233/23/5/054007

- ③ Agustinus Winarno, Satoru Takahashi, Akiko Hirai, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto: Absolute measurement of gauge block without wringing using tandem low-coherence interferometry, Meas. Sci. Technol. 23, 査読有, 2012, 125001 1-8, DOI:10.1088/0957-0233/23/12/125001
- ④ D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto: Temporal coherence shaping based on spectral-domain destructive interference of pulses with different self-phase modulations, Journal of the European Optical Society 8, 査読有, 2012, 13018 1-6, DOI:10.2971/jeos.2013.13018
- ⑤ Narin Chanthawong, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto: Absolute Measurement of Baselines up to 403 m Using Heterodyne Temporal Coherence Interferometer with Optical Frequency Comb, Measurement Science and Technology 23, 2012, 査読有, 054003 1-6, DOI:10.1088/0957-0233/23/5/054003

[学会発表] (計59件)

- ① Kiyoshi Takamasu: Roughness and Line Profile Measurement of Photoresist and FinFET Features by Cross-Section STEM Image for Reference Metrology, SPIE Advanced Lithography 2014, San Jose, USA, 2014年2月27日
- ② 高増潔: 多点法による誤差分離手法と不確かさ推定, 第14回高エネ研メカ・ワークショップ報告集, つくば(招待講演), 高エネルギー加速器研究機構, 茨城, 2013年04月12日
- ③ K. Takamasu: Round Robin Tests of Uncertainty Estimation for Coordinate Metrology by Software Error Propagation, XX IMEKO World Congress, Busan, Korea, 2012年09月10日
- ④ 高増潔: 三次元測定の現状と課題, 機械振興協会テクノフォーラム 製造現場を支える三次元測定(招待講演), 機械振興会館ホール, 東京, 2013年02月20日
- ⑤ K. Takamasu: Sub-nanometer Uncertainty Evaluation of Line Width Measurement by Si Lattice Structures

of STEM Image, euspen International Conference, Delft, Netherlands, 2010年6月2日

[図書] (計2件)

- ① 石原直, 加藤千幸, 光石衛, 渡邊聡編, 高増潔, 高橋哲他: 東京大学出版, ナノ・マイクロスケール機械工学, 2014, 266
- ② 東京大学大学院工学系研究科編: 震災後の工学は何をめざすのか, 内田老鶴圃, 2012, 361

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高増 潔 (TAKAMASU, Kiyoshi)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 70154896

### (2) 研究分担者

高橋 哲 (TAKAHASHI, Satoru)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 30283724

松本 弘一 (MATSUMOTO, Hirokazu)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 00358045

### (3) 連携研究者

古谷 涼秋 (FURUTANI, Ryoshu)  
東京電機大学・工学部・教授  
研究者番号: 50219119

三隅 伊知子 (MISUMI, Ichiko)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員  
研究者番号: 40358099

佐藤 理 (SATO, Osamu)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員  
研究者番号: 60392619