

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 2日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246026

研究課題名（和文）

コンパクト三次元形状計測システム Compact Nano-Profiler の開発

研究課題名（英文）

A Newly Developed Compact Three-Dimensional Profile Measuring System
"Compact Nano-Profiler"

研究代表者

新野 秀憲 (SHINNO HIDENORI)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：40196639

研究成果の概要（和文）：

本研究では、数 10 mm×数 10 mm の広い計測領域と 1 nm の高い計測分解能を同時に満足するコンパクト構造の 3 次元形状計測システム Compact Nano-Profiler を開発した。このシステムは、低重心の X-Y 平面ナノ運動テーブルシステム、重力補償機能を組み込んだ鉛直方向ナノ位置決め機構、ならびに走査形トンネル顕微鏡 STM プローブシステムから構成され、力学および熱的に安定な構造を有する超精密形状計測システムである。基本性能を明らかにするため一連の計測評価実験をおこなった結果、構築したシステムが XYZ の各軸について 1 nm の高い位置決め分解能を有すること、長時間にわたる計測時間においても高い計測安定性を有すること、ならびに高い繰返し精度を有することをそれぞれ確認した。さらに STM プローブを原子間力顕微鏡 AFM プローブに換装することにより、絶縁体であるガラスレンズなどの nm スケールの計測が可能であることについても確認し、開発したシステムが様々な材質、形状、寸法の計測対象の 3 次元ナノ形状計測が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research developed a compact type three-dimensional profile measuring system named "Compact Nano-Profiler" which achieve both a measuring range of several 10 mm and a measurement resolution of 1 nm. By combining a compact XY planar nano-motion table system, a vertical nano-motion platform with gravity compensating function and an ultra-fine probing system, the compact nano-profiler with a dynamically and thermally stable structure was newly developed and then the performances of the system were evaluated. As a result, performance evaluation results confirmed that the developed measuring system has both a positioning resolution of 1 nm and high measuring stability. In addition, a series of measuring test results confirmed the developed measuring system has a high reproducibility of nanometer scale measurement. Furthermore, use of an AFM probing system made it possible to effectively measure an insulator such as glass lens, ceramics, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2010年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2011年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
年度			
年度			
総計	32,700,000	9,810,000	42,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ナノ計測，三次元計測，コンパクト構造，ナノ形状計測，プローブシステム

1. 研究開始当初の背景

近年，半導体や光学素子等の高機能化・高集積化に代表されるように，超精密・微細構造を有する部品を組み込んだ新製品創出の要求は留まる所を知らない．例えば，ガラスレンズ成型型のような nm スケールの形状精度を有する 3 次元複雑形状の計測に際しては，数 10mm×数 10 mm の比較的広い計測範囲と nm スケールの高い計測分解能を同時に達成可能な三次元形状計測システムの実現が必要不可欠である．

しかしながら，在来の走査形プローブ顕微鏡にみられるように，一般的なナノ計測機器は， μm あるいは mm 平方の極めて狭い領域の計測を対象としており，今後，産業ニーズの高まる数 10mm × 数 10mm 空間における三次元構造を計測可能な形状計測について国内，海外を問わずほとんど検討が行われていない．また，現状の形状計測システムは，いずれも測定対象のスケールに比較して大形であり，いずれも在来の構成要素の組み合わせから構成されているに過ぎない．

本研究では，研究グループの保有するコア技術を統合することにより，広領域計測と nm スケールの高分解能計測を同時に実現可能な理想的な構造を備えた革新的なコンパクト形ナノ形状計測システムの開発を目標とした．

2. 研究の目的

本研究では，当該計測システムの設計段階で可能な限りの誤差発生要因の排除と極小化を行い，構造設計面からの詳細な検討結果に基づいて理想的な構造を有する三次元ナノ形状計測システムを開発することを目的とした．そのため，すべての運動軸（直動軸及び回転軸）において空気静圧軸受およびボイスコイルモータを適用することにより完全非接触による安定化構造の実現を目指した．開発したシステムは，低重心構造の平面ナノ運動テーブルシステム，重力補償機能を有する鉛直方向ナノ運動機構，nm オーダの位置決め分解能と nm オーダの運動繰返し精度を達成可能なプロービングシステムから構成された．

上記の研究目的を達成するため，以下の要素研究を段階的に遂行した．

- (1) 低重心構造の平面運動ナノテーブルシステムおよび重力補償機能を備えた鉛直方向ナノ運動機構などの新たな要素開発
- (2) 開発した構成要素の組合せによる三次元形状計測システムの全体構造の構築

- (3) 開発したシステムの基本特性評価
- (4) 開発したシステムの計測性能の評価

3. 研究の方法

- (1) 平面運動ナノテーブルシステムおよび鉛直方向ナノ運動ステージの構築

開発した低重心 X-Y 平面ナノ運動テーブルシステムを図 1 に示す．この運動テーブルは，空気静圧案内で非接触支持されると共に，ボイスコイルモータで非接触駆動される．案内系と駆動系を共に非接触構造にすることにより，摩擦等の非線形現象の発生を抑制している．また，従来の X-Y ステージが 1 軸ステージの積層によって構成されるのに対し，本システムは積層することなく低重心で X-Y 平面ナノ運動を実現しており，運動テーブルにおける運動誤差の発生を抑制している．

図 2 には，鉛直方向ナノ運動機構を示す．鉛直運動部は，空気静圧案内およびボイスコイルモータにより，平面運動テーブルシステムと同様に完全非接触で支持・駆動される．さらに，真空シリンダを用いた非接触重力補償機構を備えており，非接触状態で重力の位置決めに与える影響を抑制している．

空間の座標位置はレーザ干渉計により計測される．レーザ干渉計は高い計測分解能を有しており，さらに運動軸とレーザ干渉計の光軸を合わせることで，アッペ誤差の発生を抑制している．

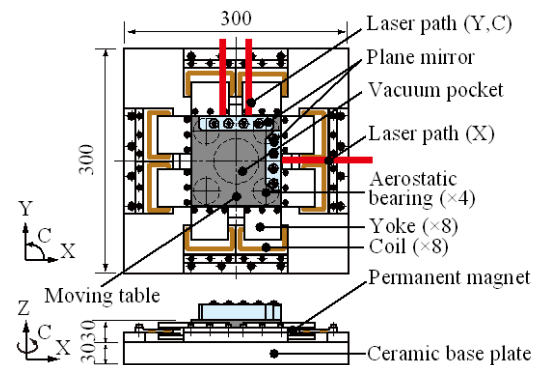


図 1 平面運動ナノテーブルシステム

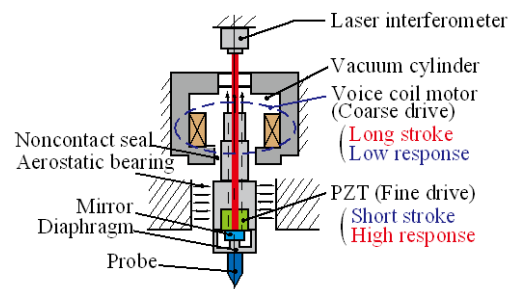


図 2 鉛直方向ナノ運動ステージ

(2) 三次元形状計測システム Compact Nano-Profiler の構築

本研究で開発する三次元形状計測システムの設計概念を図 3 に示す。構造の最適化、誤差要因の最小化、ならびにナノ運動制御を行なうことにより、安定な nm スケールの計測が可能な計測システムを実現した。

図 4 に開発する三次元計測システムの概要を示す。鉛直方向ナノ運動機構にプロービングシステムを設置し、プローブ先端と計測面との距離が一定となるように Z 軸方向に駆動しながら、XY 方向に走査することで三次元形状の取得が可能とした。Z 軸の駆動には長いストロークと高い応答速度が要求されるため Z 軸の駆動に高い応答速度を持つ圧電素子と長い駆動距離を持つボイスコイルモータを組合せることにより、長ストロークと高応答速度を両立させた。

開発したシステムの構成を図 5 に、外観を図 6 にそれぞれ示す。ベースやコラム等の主要構成要素にセラミックスを適用することにより、熱的、力学的安定性を確保した。全体構造は制振システム上に設置し、温湿度制御によるエンクロージャに格納することにより、熱および振動が計測に与える影響を低減した。

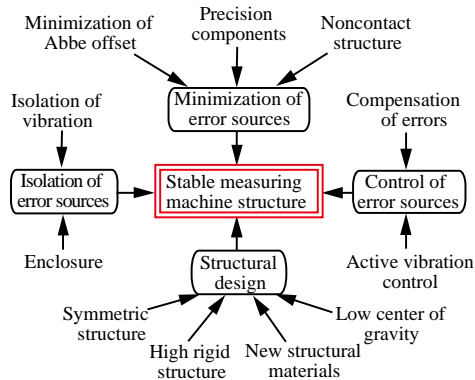


図 3 三次元形状計測システムの設計概念

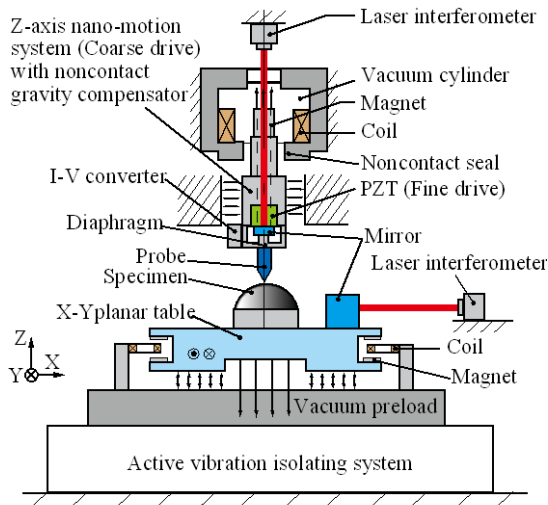


図 4 三次元形状計測システムの概要

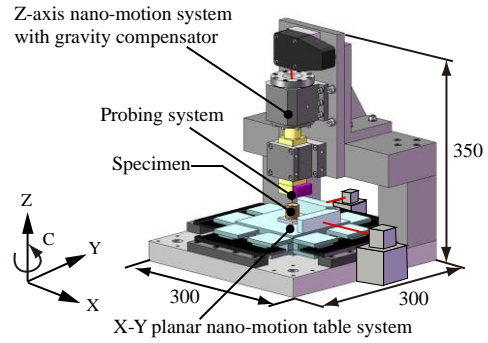


図 5 三次元形状計測システムの構成

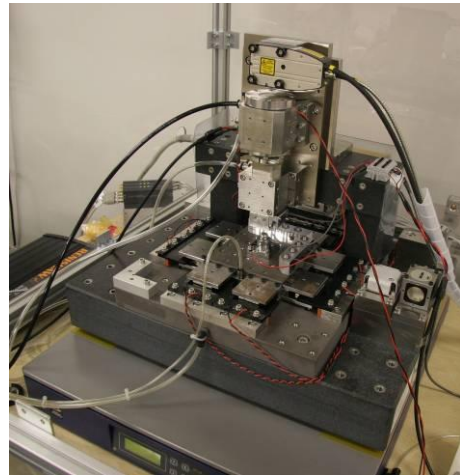


図 6 三次元形状計測システムの外観

(3) 構築したシステムの基本特性の評価

構築したシステムの位置決め分解能を評価するため、3 軸同時制御状態で XYZ 軸のそれぞれに 1 nm のステップ駆動をおこなわせた。ステップ駆動結果を図 7 に示す。図 7 において XYZ の各軸に関して明確な 1 nm のステップが確認できる。この結果から、構築したシステムが XYZ の各軸に関して 1 nm の位置決め分解能を有することを確認した。さらに、それぞれの軸の駆動が他の軸の位置決め特性に影響を与えないことを確認し、軸間の干渉のない高精度な位置決めが可能であることを明らかにした。

次に、構築したシステムの長時間計測安定性を評価するため、エンクロージャ内に温度制御された圧縮空気を供給した状態で、5 時間にわたってプロービングにフィードバック制御をかけてプローブと計測点の位置を一定に保ち、その際の計測点近傍の温度と Z 軸の変位を計測した。計測結果を図 8 に示す。5 時間における計測点近傍の温度は $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ の範囲に保たれており、計測システムが高い温度安定性を有すること、5 時間の長時間計測における変位のばらつきが $\pm 100 \text{ nm}$ であり、計測システムが高い計測安定性を有することを明らかにした。

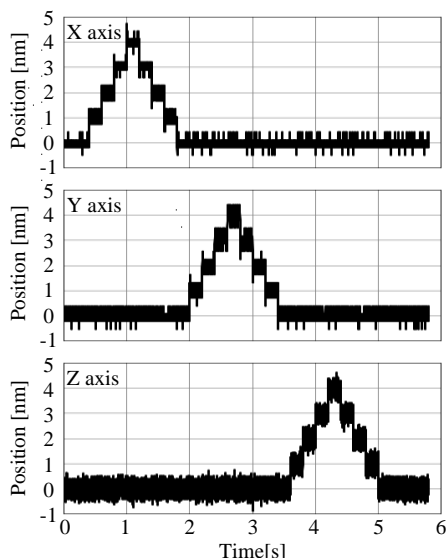
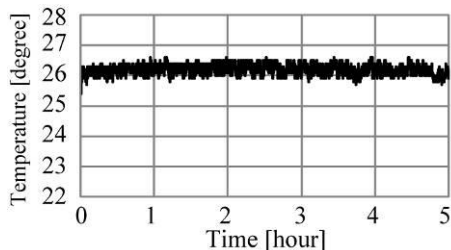
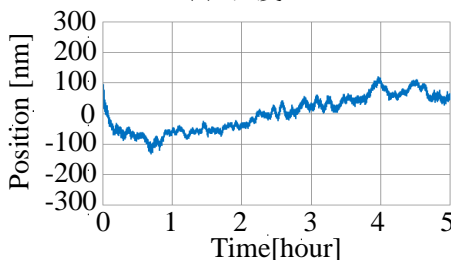


図 7 位置決めシステムの分解能評価



(a) 温度



(b) 変位

図 8 システムの長時間計測安定性の評価

(4) 構築したシステムの計測特性の評価

構築した計測システムの性能を評価するために、プロービングシステムに STM (走査形トンネル電流顕微鏡) プローブを用いて 18 nm の段差を持つ段差標準試料の計測をおこなった。

計測システムによって得られた三次元プロフィールを図 9 に示す。図のように明確な段差が確認でき、構築した計測システムが nm スケールの高い計測分解能を持つことを明らかにした。

次に、段差の一つについて 20 回の繰返し計測をおこない、繰返し精度の評価をおこなった。段差の繰返し計測の結果を図 10 に示す。20 回の計測における段差の計測結果のばらつきはおよそ 4 nm であり、構築したシステムが高い繰返し精度を有することを明ら

かにした。また、クロスチェックのため、白色干渉計 (ZYGO 社 NewView 5032) によって計測した段差の平均値との比較をおこなった。白色干渉計によって計測した段差の平均値は 16.9 nm であり、構築した計測システムと白色干渉計とで段差の計測結果が一致することを確認した。

構築したシステムによる幅広い対象の形状計測の可能性を評価するため、プロービングシステムに AFM (原子力顕微鏡) プローブを用い、図 11 に示すシリコン製の球面レンズの計測をおこなった。

計測システムによって計測したガラスレンズの三次元プロフィールを図 12 に示す。2 mm の範囲において球面の形状が得られており、構築した計測システムにより広い範囲の形状計測が可能であることを明らかにした。

計測システムによって得たガラスレンズの断面プロフィールを図 13 に示す。比較のため、図 13 に触針式形状計測装置 (Form Talysurf) によって計測した断面プロフィールを併せて示す。両者の計測形状が一致していることから、構築した計測システムが高い計測信頼性を有することを確認した。

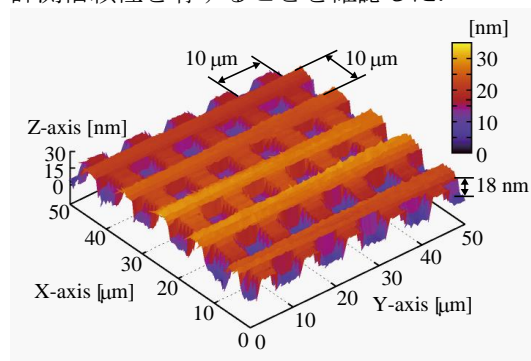


図 9 段差標準試料の三次元プロフィール

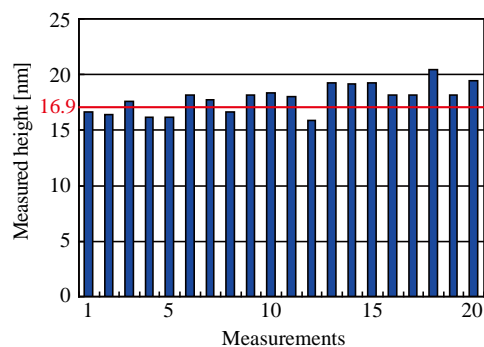


図 10 段差標準試料の繰返し計測結果

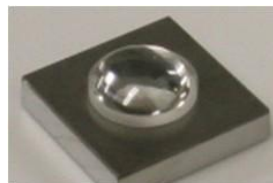


図 11 ガラスレンズ試料

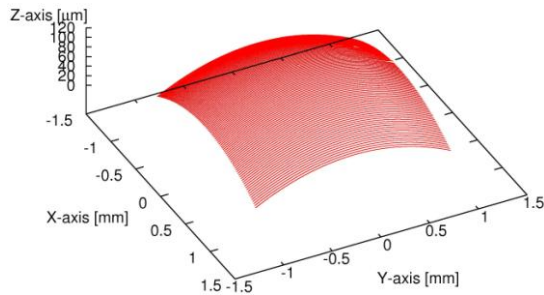


図 12 ガラスレンズの三次元プロファイル

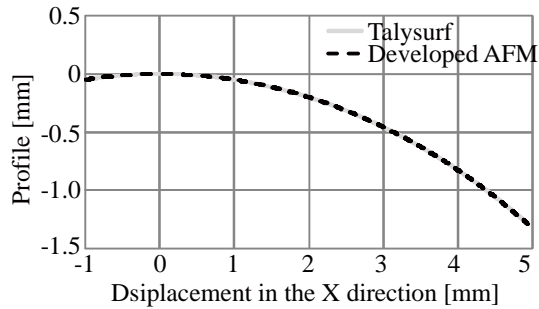


図 13 ガラスレンズの断面プロファイル

4. 研究成果

本研究で得た研究成果を以下に示す。

- (1) 非接触構造および誤差発生要因の最小化により、高い位置決め分解能を有する平面運動ナノテーブルシステムおよび鉛直方向ナノ運動機構を構築した。
- (2) 10mm スケールの計測範囲と 1nm スケールの計測分解能を有する三次元形状計測システムの設計概念を提示し、コンパクト構造の三次元形状計測システム Compact Nano-Profilier を構築した。
- (3) 構築した計測システムの基本特性の評価をおこない、構築したシステムが XYZ 各軸について 1nm の位置決め分解能をもつこと、ならびに高い計測安定性を有することを確認した。
- (4) 構築した計測システムの計測特性の評価をおこない、構築した計測システムが高い繰返し精度を持つこと、ならびに幅広い計測対象の形状計測が可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線を付す)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Sawano Hiroshi, Takahashi Motohiro, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, Mitsui Kimiyuki, On-Machine Optical Surface Profile Measuring System for Nano-Machining, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.5, No.3,

2011, pp.369–376.

- ② 清水 一力, 澤野 宏, 吉岡 勇人, 新野 秀憲, 精密機械システム用非接触構造アクティブ除振ユニット, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, Vol.77, No.782, 2011, pp.3572–3580.
- ③ 綾田 翔, 澤野 宏, 吉岡 勇人, 新野 秀憲, AFMプローブを用いた三次元形状計測システム, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, Vol.77, No.782, 2011, pp.3597–3607.
- ④ Shinno Hidenori, Yoshioka Hayato, Gokan Toshimichi, Sawano Hiroshi, A Newly Developed Three-Dimensional Profile Scanner with Nanometer Spatial Resolution, Cirp Annals – Manufacturing Technology, 査読有, Vol.59, No.1, 2010, pp.525–528.
- ⑤ Sawano Hiroshi, Gokan Toshimichi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, Three-Dimensional Nano-Motion System for SPM-Based CMM, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 査読有, Vol.4, No.6, 2010, pp.1192–1200.
- ⑥ Kurisaki Yugo, Sawano Hiroshi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, A Newly Developed X-Y Planar Nano-Motion Table System with Large Travel Range, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 査読有, Vol.4, No.5, 2010, pp.976–984.
- ⑦ Shinno Hidenori, Yoshioka Hayato, Sawano Hiroshi, A Newly Developed Long Range Positioning Table System with a Sub-Nanometer Resolution, Cirp Annals – Manufacturing Technology, 査読有, Vol.4, No.6, 2010, pp.1192–1200.
- ⑧ Shinno Hidenori, Yoshioka Hayato, Hayashi Mamoru, A High Performance Tilting Platform Driven by Hybrid Actuator, Cirp Annals – Manufacturing Technology, 査読有, Vol.58, No.1, 2009, pp.363–366.

[学会発表] (計 9 件)

- ① Yoshioka Hayato, Fujiki Yusuke, Sawano Hiroshi, Shinno Hidenori, In-Process Ultrasonic Monitoring Method for Cutting Process, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2011年11月9日, Saitama, Japan.

- ② Sawano Hiroshi, Ayada Sho, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, A Newly Developed AFM-Based Three Dimensional Profile Measuring System, The 11th International Conference of the euspen, 2011年5月25日, Lake Como, Italy.
- ③ Yoshioka Hayato, Kuroyama Shota, Sawano Hiroshi, Shinno Hidenori, Structural Design of Long Range Sub-Nanometer Positioning System, The 11th International Conference of the euspen, 2011年5月25日, Lake Como, Italy.
- ④ 綾田 翔, 澤野 宏, 吉岡 勇人, 新野 秀憲, AFMプローブを用いた三次元形状計測システム, 第8回生産加工・工作機械部門講演会, 2010年11月19日, 岡山.
- ⑤ Sawano Hiroshi, Takahashi Motohiro, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, Mitsui Kimiyuki, On-Machine Shape Measuring System by Means of Optical Stylus for Nano-Machining, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2010年10月27日, Gifu, Japan.
- ⑥ Sawano Hiroshi, Gokan Toshimichi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, Three-Dimensional Nano-Positioning System for Compact CMM, The 10th International Conference of the euspen, 2010年6月2日, Delft, Netherland.
- ⑦ Kurisaki Yugo, Sawano Hiroshi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, A Newly Developed X-Y Planar Nano-Motion Table System with Large Travel Ranges, The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2009年12月2日, Osaka, Japan.
- ⑧ Hayahi Mamoru, Sawano Hiroshi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, Torque Error Compensation in Pneumatic Rotary Actuator System Using an Electromagnetic Force, The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2009年12月2日, Osaka, Japan.
- ⑨ Hayashi Mamoru, Sawano Hiroshi, Yoshioka Hayato, Shinno Hidenori, High Torque and High Precision Rotary Table System Driven by Hybrid Actuator, The 9th International Conference of the euspen, 2009年6月4日, San Sebastian, Spain.

〔図書〕(計1件)

- ① Hidenori Shinno, Chapter 4, Various Remedies for Reduction of Thermal Deformation, Thermal Deformation in Machine Tools (Edited by Yoshimi Ito), pp.117-141, McGraw-Hill, (2010).

〔その他〕

○新聞発表(計3件)

- ① “3次元計測装置, ナノからミリまでカバー, 東工大 精密位置制御で高精度”, 日刊工業新聞 朝刊, 2010年8月24日, 科学技術・大学欄.
- ② “位置決めシステム, 東工大 ワーク制御1ナノメートル以下”, 日刊工業新聞 朝刊, 2011年6月24日, 科学技術・大学欄.
- ③ “ワーク外さず精密測定, 東工大 レーザーで非接触”, 日刊工業新聞 朝刊, 2012年1月10日, 科学技術・大学欄.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新野 秀憲 (SHINNO HIDENORI)
東京工業大学・精密工学研究所・教授
研究者番号: 40196639

(2) 研究分担者

吉岡 勇人 (YOSHIOKA HAYATO)
東京工業大学・精密工学研究所・准教授
研究者番号: 90361758

澤野 宏 (SAWANO HIROSHI)

東京工業大学・精密工学研究所・助教
研究者番号: 40514295

(3) 連携研究者

なし