

令和2年度 研究助成・成果報告書(概要)

本報告書は、公益財団法人三豊科学技術振興協会が令和2年度に実施した研究助成に関して、それぞれの研究成果を報告書としてまとめたものです。

目 次 / I N D E X

1. ナノカーボンが持つ腐食作用を逆手に取った触媒支援型ナノ化学リソグラフィー
Catalyst-assisted nanolithography utilizing nanocarbons enhancing corrosions
大阪大学 大学院 工学研究科 准教授 有馬健太
Graduate School of Engineering Kenta Arima
Osaka University Associate Professor
2. 近赤外吸収特性を利用した水中の粒子の3次元位置計測
Three-dimensional position measurement of particles in water
using near-infrared absorption characteristics
東京都立大学 大学院 システムデザイン研究科 教授 角田 直人
Graduate School of Systems Design Naoto Kakuta
Tokyo Metropolitan University Professor
3. 画像を用いた5 軸加工機の動的運動誤差の測定に関する研究
Study on vision-based motion error measurement of 5-axis machine tools
京都大学 大学院 工学研究科 准教授 河野 大輔
Graduate School of Engineering, Daisuke Kono
Kyoto University Associate Professor
4. 超小型ソリッドステート光短パルス測定器の研究・開発
Study and Development of Ultra-Compact and
Solid-State Optical Short Pulse Measurement Device
宇都宮大学 工学部 助教 近藤 圭祐
School of Engineering Keisuke Kondo
Utsunomiya University Assistant Professor
5. アボガドロ定数にトレーサブルなナノ精度フリーフォーム形状測定技術の開発
Development of nano-accuracy free-form profile measurement technology
traceable to Avogadro constant
産業技術総合研究所 計量標準総合センター 主任研究員 近藤 余範
National Metrology Institute of Japan Yohan Kondo
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Senior Researcher

6. 磁気ギアードリニアモータの高精度制御
High-precision Control of Magnetic Geared Linear Motor

横浜国立大学 大学院 工学研究院 准教授
Faculty of Engineering,
Yokohama National University Associate Professor

下野 誠通
Tomoyuki Shimono

7. ロッキングカーブ検出法を用いたGI-SAXSによる1次元回折格子ピッチ校正法に関する研究
Pitch calibrations for 1D gratings by rocking-curve detection method
with grazing-incidence small-angle X-ray scattering

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 主任研究員
National Metrology Institute of Japan
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

堀 泰明
Yasuaki Hori
Senior Researcher

8. 微小環境マニピュレーションのための力覚伝送機能を有する
スケーリング型遠隔制御技術に関する研究

Research on Scaling Type Remote Control with Tactile Sensation for Micromanipulation

神戸大学 大学院 海事科学研究科 准教授
Graduate School of Maritime Sciences,
Kobe University Associate Professor

元井 直樹
Naoki Motoi

9. ワイヤークAMによる消耗電極ワイヤの溶滴移行制御を用いた高精度造形技術の開発
Development of high-accuracy building process based on control of metal transfer behavior of
filler wire in wire arc additive manufacturing

金沢大学 設計製造技術研究所 助教
Advanced Manufacturing Technology Institute,
Kanazawa University Assistant Professor

山口 貢
Mitsugu Yamaguchi

ナノカーボンが持つ腐食作用を逆手に取った触媒支援型ナノ化学リソグラフィー
有馬健太
国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科

1. 概要

近年、グラフェンに代表されるナノカーボン材料は、接触した固体表面の腐食を促進するという奇妙な性質を持つことが分かり、腐食・防食分野で課題となっている。一方で我々は、ネガティブな“腐食作用”を“酸化促進能力”と逆手に捉えることにより、触媒援用型の新たな化学エッチング法になるのではと着想した。本研究では最終的に、ナノカーボン触媒を用いた溶液中での半導体表面に対する新たなリソグラフィー法を打ち立てることを目標としている。このような背景の下で、本研究期間ではまず、ナノカーボン材料が発現する半導体表面のエッチング促進性能、すなわち触媒性能を計測・評価する手法の開発に取り組んだ。そして、原子間力顕微鏡の画像をヒストグラム解析することが有効であることを見出した。次に、個々のナノカーボン材料の電子状態を可視化すべく、走査型トンネル顕微鏡による原子レベル観察を行った。そして、エッジ部などの線状欠陥が対向することにより、フェルミレベル近傍の電子が特異な周期構造を形成することを明らかにした。今後はこれらの知見を基に、触媒支援型ナノ化学リソグラフィーの高度化を図る予定である。

2. 成果発表

(1) 原著論文

- 1.1 Junhuan Li, Shaoxian Li, Tomoki Higashi, Kentaro Kawai, Kouji Inagaki, Kazuya Yamamura, and **Kenta Arima**
“Atomic-scale insights into the origin of rectangular lattice in nanographene probed by scanning tunneling microscopy”
Physical Review B, Vol. **103**, No. 24, pp. 245433 1-9 (2021).
- 1.2 Ayumi Ogasawara, Kentaro Kawai, Kazuya Yamamura and **Kenta Arima**
“Nanocarbon-Induced Etching Property of Semiconductor Surfaces: Testing Nanocarbon's Catalytic Activity for Oxygen Reduction Reaction at a Single-Sheet Level”
ECS Journal of Solid State Science and Technology, Vol. **11**, No. 4, pp. 041001 1-5 (2022).

(2) 総説・解説、著書

- 2.1 三栗野諒、小笠原歩見、川合健太郎、山村和也、**有馬健太**
“ナノカーボンの触媒作用に基づく半導体表面の選択エッチング”
表面と真空、64 巻、8 号、pp. 352-357 (2021).

2.2 **有馬健太**

“第4節 触媒アシストエッチング”

半導体製造におけるウェット／ドライエッチング技術、(株) R&D 支援センター、東京 (2022) **【発刊予定】**。

(補足) 上記書籍において、第4章「新しいエッチング技術の研究開発動向」の中の上記一節を執筆した。

近赤外吸収特性を利用した水中の粒子の3次元位置計測

角田 直人

東京都立大学

1. 概要

本研究の目的は、水の近赤外吸収特性を応用した、水中の粒子の3次元位置測定技術を開発することである。近赤外域に存在する水の吸収帯は波長間で吸収係数差が大きいため、水への光到達深さが波長によって大きく異なる。本研究ではこの原理を応用し、2つの光学計測モード（反射型と透過型）によって粒子位置計測を実施した。反射型では、複数波長を順次照射して1台のカメラで連続撮像し、波長間での反射光強度の違いを利用してセル内の各粒子の深度を推定した。厚さ1 mmの水中に存在する直径10–100 μm の金属粒子の場合、深さ位置を数 μm で判別できる可能性を示した。また、透過型では10 mm厚さの領域に対して直交2方向のイメージングによって3次元粒子位置および速度を推定した。両手法とも、従来の粒子計測法とは原理的に異なり、一軸光学系で可動部もない簡便な測定法である。加えて、温度や濃度との同時測定の可能性も示した。

2. 成果発表

【学術雑誌論文】

- [1] The Anh Nguyen, Naoto Kakuta, Experimental study on the initial thermal plumes produced by small heating plates in water, *Experimental Thermal and Fluid Science* 142, 110803, 2023.
- [2] The Anh Nguyen, Katsuya Kondo, Naoto Kakuta, Near-infrared measurement of temperature fields formed by mixed convection from a small heating sphere in water, *International Journal of Thermal Sciences* 176, 107498, 2022.

【国際学術会議発表】

- [3] The Anh Nguyen, Naoto Kakuta, Near-field of convective plumes from a locally heating source in water, *The 16th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp. 699–704, 2022.
- [4] The Anh Nguyen, Naoto Kakuta, Analysis of natural convection over a heating plate in water using near-infrared imaging technique, *The 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp. 279–284, 2021.

【国内学術会議発表】

- [5] The Anh Nguyen, 近藤克哉, 角田直人, Visualization of thermal plumes from a small heat source in water, 熱工学コンファレンス 2022, C133, 2022.
- [6] The Anh Nguyen, Naoto Kakuta, Formation of convective plumes from a locally heating source in water, *COMSOL Simulations Week*, 2021.
- [7] The Anh Nguyen, 近藤克哉, 角田直人, Effect of the top shape of enclosures on natural convection in water, 第58回日本伝熱シンポジウム, B325, 2021.
- [8] The Anh Nguyen, 近藤克哉, 角田直人, 閉空間形状が与える水中の微小発熱源からの自然対流への影響, 日本機械学会関東支部第27期総会・講演会, 11E13, 2021.

画像を用いた 5 軸加工機の動的運動誤差の測定に関する研究

Study on vision-based motion error measurement of 5-axis machine tools

河 野 大 輔

Daisuke Kono

京都大学 大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

1. 概要

本研究では、画像を用いて工作機械の任意の運動軌跡における運動誤差を測定する方法を研究した。マイクロメートルレベルの分解能を得るために、発光するターゲットマーカを開発し、放射基底関数をマーカの輝度分布にフィッティングすることでマーカの中心位置を求める方法を考案した。測定分解能と測定精度の評価のために、ステップ位置決め運動と 2 次元での円弧補間運動における運動軌跡測定を行った。ステップ位置決め運動の測定では、1/60 ピクセル以下（本実験では $10\mu\text{m}$ 以下に相当）の測定分解能が得られることが示された。また、円弧補間運動の測定では、市販のグリッドエンコーダと比較して、 $10\mu\text{m}$ 程度の差で測定が行えることが分かった。3 次元での任意の運動軌跡の測定のための基礎評価として、マーカの位置同定における撮影方向の影響を調べた。撮影方向の変化によって、最大で $100\mu\text{m}$ 程度の同定誤差が生じる場合があり、今後の課題であることが分かった。

2. 成果発表

- (1) Haochen HUANG, Daisuke KONO, Masahiro TOYOURA Vision based two-dimensional measurement of machine tool motion trajectory, 2021 年度精密工学会春季大会, B0103, 2021 年 3 月, Online
- (2) Haochen HUANG, Daisuke KONO, Masahiro TOYOURA Study on target marker development for three dimensional vision-based position detection based on optical scattering principle, 2021 年度精密工学会秋季大会, H96, 2021 年 9 月, Online
- (3) Haochen HUANG, Daisuke KONO, Masahiro TOYOURA, Vision Based Two-Dimensional Measurement of Machine Tool Motion Trajectory, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21, B01, Nov. 2021, Online
- (4) Haochen HUANG, Daisuke KONO, Masahiro TOYOURA, Vision-based vibration measurement of machine tool, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.16, Issue 1, 2022, JAMDSM0014

超小型シリッドステート光短パルス測定器の研究・開発

近藤 圭祐

宇都宮大学 工学部

1. 概要

本研究はシリコンフォトニクス技術により製作するチップサイズの光短パルス測定器の開発を目的としている。本研究によって、チップサイズの光相関器とベンチトップの波長可変フィルタの組み合わせによる短パルスの振幅と位相の測定を実証できた。光相関器は長さ 1.36 mm の光導波路上に埋め込まれた 32 個の二光子吸収フォトダイオードアレイで構成される。波長可変フィルタの走査によりピコ秒パルスの波長を 1545.5 – 1555.0 nm の範囲で分解し、それぞれの波長における相関関数を測定することでスペクトログラムを取得した。さらに、そのスペクトログラムからパルスの振幅と位相を再生することに成功した。本研究の成果によってパルス波形測定器を劇的に小さくできる可能性が示された。

2. 成果発表

論文誌

- (1) K. Kondo and H. Oshima, “Ultracompact autocorrelator with pulse-width-range switch function integrated on a silicon photonic chip,” Japanese J. Appl. Phys., vol. 61, pp.SK1016-SK1016, (2022).

学術会議

- (2) 近藤圭祐, “シリコンフォトニクスを用いた光学-電子集積デバイス,” 第 148 回オプティクス教育研究セミナー, 2021 年 7 月 (依頼講演)
- (3) 大嶋広樹, 近藤圭祐, “二光子吸収フォトダイオードアレイ付き導波路型光相関計のパルス幅測定レンジ切り替え機能の実証,” 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 2021 年 9 月.
- (4) K. Kondo and H. Oshima, “Ultracompact autocorrelator with pulse-width-range switch function integrated on silicon photonic chip,” 26th Microoptics Conference (MOC 2021), Sep. 2021.
- (5) 近藤圭祐, “超小型光相関チップを用いた光パルスの振幅・位相計測技術の開発,” 令和 3 年度 産学連携技術シーズ発表会, 2022 年 1 月.
- (6) 近藤圭祐, 大嶋広樹, 杉原興浩, “シリコンフォトニクス光相関器を用いたパルス振幅・位相再生デバイス,” 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月.
- (7) 大嶋広樹, 近藤圭祐, 杉原興浩, “シリコンフォトニクス光相関器を用いたパルス振幅・位相再生の動作実証” 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月.
- (8) 近藤圭祐 “シリコンフォトニクスと集積光デバイスの研究,” 第 4 回 UU-CORE セミナー, 2022 年 10 月.
- (9) 近藤圭祐, 大嶋広樹, 杉原興浩, “シリコンフォトニクス光相関器を用いた光パルス振幅・位相測定,” Optics and Photonics Japan 2022 (OPJ 2022), 2022 年 11 月.

アボガドロ定数にトレーサブルなナノ精度フリーフォーム形状測定技術の開発

近藤余範¹、倉本直樹²

¹産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 長さ標準研究グループ

²産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 質量標準研究グループ

1. 概要

本研究は、 μ -CMM (micro-Coordinate Measuring Machine)のプローブ校正に用いる基準球の直径校正に関するものである。我々は、従来の長さ測定手法とは全く異なる、質量と密度測定に基づく新たな直径校正手法の確立に向け取り組んでいる。基本的な考え方は、質量および密度測定を利用した高精度平均直径測定である。基準球の体積値を高精度な密度測定（圧力浮遊法）と質量測定（1 kg 標準シリコン球との比較測定）より算出し、そこから平均直径値を高精度に決定する。体積値より求めた平均直径値を基準として、プローブ球の平均半径値を算出する。ここで、基準球の体積を V 、密度を ρ 、質量を m とすると、平均半径値 r は、

$$r = (3/4\pi \times V)^{1/3} = (3/4\pi \times m/\rho)^{1/3} \quad (1)$$

と与えられ、高精度な密度及び質量測定により、高精度に平均直径値を決定することができる。式(1)よりわかる様に、密度測定及び質量測定の不確かさの 1/3 が、平均半径値決定に対する不確かさとして寄与することになる。高精度に密度値を決定するためには、密度測定の基準となる高精度な密度標準試料を用意する必要があるが、産総研では SI 単位の定義改定に向けて、超高精度なアボガドロ定数の測定に長年取り組んできた実績があり、この成果は超高精度な標準シリコン球（1 kg）の密度値決定に直結している。この 1 kg シリコン球体を密度測定の標準とした比較測定の連鎖により、基準球の密度値を高精度に決定する。そして、超高精度質量測定と組み合わせることにより体積値を決定し、シリコン基準球の平均直径の校正不確かさとして 5 nm 以下を目指している。現在、高精度シリコン球を製作し、質量および密度測定を用いた平均直径の算出をしたところである。

一方で、提案手法の妥当性確認を目的の一つとして、従来の長さ測定に基づく μ -CMM を用いた基準球の 2 点直径測定手法についても研究開発を行った。 μ -CMM に基づく直径測定であり、直径呼び寸法 12.7 mm の窒化珪素球を実測した結果、不確かさ 21 nm ($k=2$) で 2 点直径の校正を実現した。本成果は、国際学術誌に発表を行った（下記参照）。現在、高精度シリコン球を製作し、質量および密度測定を用いた平均直径と μ -CMM を用いた平均直径との比較測定を実施しており、提案手法の妥当性検証を行っている。

2. 研究成果

1. Y. Kondo, A. Hirai and Y. Bitou, Two-point diameter calibration of a sphere using a micro-coordinate measuring machine at NMIJ, Metrologia, 59(2), 024005, 2022

磁気ギアードリニアモータの高精度制御

下野 誠通

横浜国立大学工学研究院

1. 概要

本研究課題では、リニアモータの高推力密度化を目指し、磁気ギア構造を内包する新たなリニアモータの開発を行った。考案した磁気ギアードリニアモータ内部の磁束密度分布を表す数値モデルを構築し、モータが発生する推力の理論式を導出した。数式から得られる理論値、有限要素法に基づいたシミュレーション解析値、試作機を用いた基礎実験による測定値を比較することで、その妥当性を検証した。さらに、本モータの運動方程式を導出し、基本的な運動制御手法の考案を行った。試作モータを用いた運動制御実験から、その有用性を確認することができた。これらの研究成果により、高推力密度化を実現するための磁気ギア構造を援用したリニアモータに関する電気機器学分野を開拓することができ、モーションシステムとしての実用性を明らかにすることができた。

2. 成果発表

学術論文誌

Nguyen Duc Khuong and Tomoyuki Shimono, “Modeling, Analysis, and Experimental Validation of a Magnetic Geared Linear Motor,” IEEJ Journal of Industry Applications (投稿済・査読中)

国際会議論文発表 (査読付き)

Nguyen Duc Khuong and Tomoyuki Shimono, “Modeling and Analysis of a Magnetic Geared Linear Motor,” International Power Electronics Conference 2022 (IPEC2022), 2022 年 5 月 16 日, 姫路

以上

ロッキングカーブ検出法を用いた GI-SAXS による 1 次元回折格子ピッチ校正法に関する研究

Pitch calibrations for 1D gratings by rocking-curve detection method

with grazing-incidence small-angle X-ray scattering

堀 泰明

Yasuaki Hori

産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1. 概要

半導体検査装置のスケール校正における標準試料として、100 nm 以下のピッチを有する 1 次元回折格子が用いられている。本研究では、微小角入射 X 線小角散乱法 (GI-SAXS) による 1 次元回折格子のピッチ校正と、その結果に基づく誤差解析を実施し、試料の表面周期構造に起因する X 線回折信号と表面層構造に起因する X 線干渉信号との重畳が GI-SAXS の系統誤差要因となることを明らかにした。この系統誤差の低減を目的としたロッキングカーブ検出法に基づく補正法を提案し、100 nm ピッチ校正に適用した。その結果、0.91 nm の系統誤差が 0.08 nm に低減することを確認した。我々が開発した GI-SAXS 装置及び提案手法の繰り返し測定に基づき、100 nm ピッチ校正の合成標準不確かさを 0.22 nm と評価した。

2. 成果発表

なし

微小環境マニピュレーションのための力覚伝送機能を有する
スケーリング型遠隔制御技術に関する研究

元井直樹

神戸大学

1. 概要

本研究では、微小環境マニピュレーションのための力覚伝送を有するスケーリング型バイラテラル制御の実現を目指す。そのために、スケーリング型遠隔制御システムを試作開発した。本システムはピエゾアクチュエータにより 100 マイクロメートルまでの動作が可能であり、デジタルマイクロスコープにより微小マニピュレーションを視認できる。さらに、開発したシステムにマイクロマクロバイラテラル制御を実装し、数マイクロメートルから数十マイクロメートルの範囲内でマイクロマクロバイラテラル制御での力覚伝送を実証した。本技術の確立により、視覚・力覚情報を伴う直接的な動作により、微小マニピュレーションにおける操作性が向上した。

2. 成果発表

【学術論文誌（査読有）】

- [1] Naoki Motoi, Mathis Nalbach, Shingo Ito, Philipp J. Thurner, Georg Schitter, "Force-Controlled Tensile Test of Collagen Fibril by Using 2-DOF Control System With Modeling Error Compensation," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, Vol. 3, pp. 366-374, 2022.

【国内会議】

- [2] 村雲建汰, 南舜祐, 元井直樹, "微細な力覚伝送のためのマイクロマクロバイラテラル制御システムの研究", 電気関係学会関西連合大会, 2022.

ワイヤーク AM による消耗電極ワイヤの溶滴移行制御を用いた高精度造形技術の開発

山口 貢

金沢大学 設計製造技術研究所

1. 概要

本研究は、金属 AM (Additive Manufacturing) の中で指向性エネルギー堆積法に分類されるワイヤーク AM を対象とする。低い線膨張係数を有する Fe-36wt%Ni インバー合金をワイヤーク AM に適用し、造形時のアークの挙動や金属ワイヤの溶滴移行現象を含む造形プロセスを系統立てて整理するとともに、電流、電圧、送り速度など造形条件が造形精度や品質におよぼす影響について調べた。ワイヤーク AM では、ライン造形物の形状は造形条件によって大きく異なり、適用する部品サイズ・形状に合わせて適切な条件を選定することが重要であることを明らかにした。また、面造形ではライン造形物の幾何学的形状に合わせて適切な積層ピッチを選定することが重要であることを明らかにした。これらの結果から、表面性状が良好で、かつ内部に空隙など欠陥のない高品質な造形物が得られる造形条件を確立した。

2. 成果発表

- 1) 松本惇平, 山口 貢, 古本達明, 阿部 諭, 橋本洋平, 小谷野智広: ワイヤーク AM によるオーバーハング構造の造形特性に関する研究, 日本機械学会第 14 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, C18 (2022) 296-297.
- 2) 松本惇平, 山口 貢, 古本達明, 阿部 諭: ワイヤーク AM による直線冷却管の造形特性に関する研究, 2021 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, B23 (2021) 39.