

令和3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3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. フォトニックナノジェットを用いたレーザ微細加工と表面形状・物性の同時計測
In-process measurement of surface shape and physical properties
in laser ablation using a photonic nanojet

大阪大学 大学院 工学研究科 助教
Graduate School of Engineering,
Osaka University Assistant Professor

上野原 努
Tsutomu Uenohara
2. ウォータガイドレーザ加工における光コムを利用した機能表面性状の
インプロセス制御法の確立
Development of in-process control for functional surface properties
using optical comb in WGL processing

東京大学 大学院 工学系研究科 助教
School of Engineering,
The University of Tokyo Research Associate

門屋 祥太郎
Shotaro Kadoya
3. 高周波応答ER流体を用いたハイブリッドダンパ
Hybrid Damper Utilizing High-Frequency Responsive ER Fluid

富山県立大学 工学部 知能ロボット工学科 教授
Department of Intelligent Robotics, Faculty of Engineering,
Toyama Prefectural University Professor

小柳 健一
Ken'ichi Koyanagi
4. 工作物と工具の形状を考慮した
5軸制御工作機械における誤差要因と加工誤差との間の関係の定式化
Formulation of Relationships between Error Factors and Machining Error
in 5-axis Machine Tools Considering Workpiece and Tool Geometries

名古屋大学 大学院 工学研究科 特任教授
Graduate School of Engineering,
Nagoya University Designated Professor

佐藤 隆太
Ryuta Sato
5. デュアルコム分光干渉法と両面干渉計による高精度かつ広帯域な固体屈折率測定法の開発
Development of refractive index measurement method using dual-comb
spectral interferometry and double-sided interferometry

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 研究グループ長
National Metrology Institute of Japan
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Group Leader

清水 祐公子
Yukiko Shimizu

6. 膜タンパク質を用いた走査型プローブ顕微鏡の開発
Development of Scanning Probe Microscopy Using Membrane Proteins

長岡技術科学大学 技学研究院機械系 准教授
Department of Mechanical Engineering,
Nagaoka University of Technology Associate Professor

庄司 観
Kan Shoji

7. 液浸型回転傾斜露光装置の開発
Development of liquid-immersion inclined-rotated UV lithography.

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 准教授
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology,
Keio University Associate Professor

高橋 英俊
Hidetoshi Takahashi

8. 表面プラズモン共鳴と光干渉のハイブリット計測による狭小すきま潤滑膜のトライボ特性評価
Evaluation of Tribo-Characteristics of Thin Lubricant Films by Hybrid Measurement System with
Surface Plasmon Resonance and Optical Interference

名古屋工業大学 大学院 工学研究科 准教授
Graduate School of Engineering,
Nagoya Institute of Technology Associate Professor

前川 覚
Satoru Maegawa

9. 電解液フリー電気化学的インプリントソグラフィによるマイクロ・ナノパターン形成
Micro and nanopatterning using liquid electrolyte free electrochemical imprint lithography

立命館大学 理工学部 機械工学科 教授
Department of Mechanical Engineering,
Ritsumeikan University Professor

村田 順二
Junji Murata

フォトニックナノジェットを用いたレーザー微細加工と表面形状・物性の同時計測

上野原 努

大阪大学大学院 工学研究科

1. 概要

本研究は、フォトニックナノジェットと呼ばれる特殊な光ビームを用いて、従来のレーザー加工より高い加工分解能を実現し、さらには加工と同時に表面形状および物性を計測することを目的としている。フォトニックナノジェットは、直径数マイクロメートルの誘電体マイクロ球にレーザーを照射することで発生するビームであり、波長以下の小さいビーム径と波長の数倍程度といった長い焦点深度を両立する光ビームである。これを用いることで、従来のレーザー加工よりも高い加工分解能の実現が可能である。本研究では、加工試料にレーザーを照射した際の衝撃波の伝搬特性に基づいた加工深さのインプロセス計測を提案する。ピペットで保持したマイクロ球をカンチレバー式のプローブとして利用し、加工時のマイクロ球の自由振動の様子から加工深さのインプロセス計測が可能であることを実験的に明らかにした。今後は、加工深さばかりでなく、形状や表面性状など様々なパラメータをインプロセス計測できるように、レーザー加工特有の物理現象とこれらのパラメータの関係を明らかにしていく。

2. 成果発表

【原著論文】

1. Tsutomu Uenohara, Makoto Yasuda, Yasuhiro Mizutani, and Yasuhiro Takaya, Shock wave detection for in-process depth measurement in laser ablation using a photonic nanojet, *Int. J. of Automation Technology*, (2024) *in print*
2. Reza Aulia Rahman, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Mizutani, and Yasuhiro Takaya, First Step Toward Laser Micromachining Realization by Photonic Nanojet in Water Medium, *Int. J. Automation Technol.*, Vol.15, No.4, pp. 492-502, (2021).

【学会発表】

1. Tsutomu UENOHARA, Makoto YASUDA, Yasuhiro MIZUTANI and Yasuhiro TAKAYA, In-process depth measurement in laser ablation using a photonic nanojet, LEM&P 2023, 008, New Jersey, USA, (2023)
2. M. Yasuda, T. Uenohara, Y. Mizutani, Y. Takaya, In-process measurement of processing depth in laser ablation using a photonic nanojet, The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2022 in Nara), C116, Nara, Japan, November, (2022)
3. Tsutomu Uenohara, Makoto Yasuda, Kosei Yamamoto, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, LASER MICRO MACHINING USING AN OBLIQUE PHOTONIC NANOJET WITH FOCUSED LASER BEAM IRRADIATION, 17th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 82356, (2022).
4. Tsutomu Uenohara, Makoto Yasuda, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, DETECTION OF SHOCK WAVE IN LASER ABLATION USING A PHOTONIC NANOJET, XXIII IMEKO World Congress, (2021)
5. Tsutomu Uenohara, Reza Aulia Rahman, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, LASER MICRO MACHINING USING A PHOTONIC NANOJET IN WATER MEDIUM, Proceedings of the ASME 2021 16th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 60045 (2021)

門屋祥太郎

東京大学 大学院工学系研究科

1. 概要

ウォーターガイドレーザー加工では、加工面に複雑な表面微細凹凸構造が形成される。本研究では、機能表面構造創製技術としての応用のために、ウォーターガイドレーザー加工プロセス中の表面性状のインプロセス制御を目指して、ジェット水流を光学応答検出プローブとして利用する加工・計測ビーム同軸入射による試料表面光学応答検出の基礎的検証と、ウォーターガイドレーザー加工における表面微細構造形成過程の分析を行った。ジェット水流中に測定光ビームを導入し、ジェット水流を遡ってくる光学応答を検出する光学系を構築し、ジェット水流を利用した光学応答取得可能性の検証と、表面性状の違いによる光学応答の変化の評価を行い、提案手法の基礎的な概念を実証した。またパルス数を制御した加工実験により、加工ビーム照射部近傍で発生する材料熔融・飛散により、複雑な微細凹凸、積層構造が形成される過程を分析した。本研究成果は、機能表面の創製・制御の実現だけでなく、ウォーターガイドレーザー加工の加工過渡現象自体の理解の促進や、新たな対象材料開拓などにつながるものと考えられる。

2. 成果発表

[国際会議]

Osawa et al, 19th International Conference on Precision Engineering, Nara, Japan, (2022), C094.

[国内学会]

増田秀征 他, 2021年度 精密工学会秋季大会学術講演会, オンライン, 563.

門屋祥太郎 他, 日本機械学会 2021年度年次大会, オンライン, S131-02.

大澤真悠子 他, 2022年度 精密工学会春季大会学術講演会, オンライン, A81.

大澤真悠子 他, 2023年度 精密工学会秋季大会学術講演会, 福岡工業大学, F46.

高周波応答 ER 流体を用いたハイブリッドダンパ

小柳 健一

富山県立大学工学部知能ロボット工学科

1. 概要

高速かつ精密な計測や加工のため、モータに ER (Electro-Rheological) 流体を作動流体としたダンパを取り付けたシステムを考える。ER 流体ダンパは、一定電場を印加すると一定の制動力を表すブレーキとして振舞い、回転速度に応じた電場を印加すると速度に比例した制動力を表すダンパとして用いることができる。本研究では、小型軽量の ER ダンパとするべく、新規な構造である揺動シリンダ型のダンパを開発した。また、システムのコストを削減するため、パルス電源あるいは PWM 型交流電源を用いることとし、そのような高周波の交流電場に大きく応答する ER 流体を開発した。最後に、それらを一体化して特性を検証できる、ハイブリッド ER ダンパ採用位置決めシステムを開発した。

2. 成果発表

K. Koyanagi, X. Wang, and T. Karaki, "Research on Shear Stress of Electrorheological Fluid Containing Piezoelectric Powders," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 33 Issue 8, pp. 1101-1112, DOI: 10.1177/1045389X211048219 (2022).

工作物と工具の形状を考慮した
5 軸制御工作機械における誤差要因と加工誤差との関係の定式化

佐藤 隆太
名古屋大学大学院工学研究科

1. 研究の概要

5 軸加工において加工精度に問題が生じた場合、その原因を明らかにして問題を解決することは困難であるが、これは、様々な誤差要因と加工精度との関係が定式化されていないためである。本研究では、とくに影響が大きいと考えられる回転軸系の幾何誤差と各軸のサーボ遅れによる影響について、個別の誤差要因と工作物のある箇所における加工誤差との関係を定式化する。そのためには、加工面の法線方向や工具の形状および姿勢を考慮する必要がある。本研究では、回転軸の幾何誤差と各軸のサーボ遅れによる影響について、それらを考慮した数学モデルを構築し、その数学モデルを解くことで、誤差要因と加工誤差との関係を定式化した。その結果、導かれた数式によって誤差要因が加工誤差に及ぼす影響を的確に計算できることが確認された。また、加工方法との関係で加工結果に影響を及ぼさない幾何誤差が存在することや、加工面に転写される誤差の大きさは各軸のサーボ遅れによる追従誤差よりも小さい場合があることがわかった。

今後、その結果に基づいて、加工結果から幾何誤差を同定する方法や、各軸のサーボ遅れは大きいまま加工面に転写される誤差を小さくする制御方法および加工方法について検討する予定である。

2. 成果発表

<学術論文>

- Zongze LI and Ryuta SATO: Analysis of the Contribution of Feed-axis Tracking Errors to Five-axis Simultaneous Machining Accuracy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, (2023, 投稿準備中).

<学会発表>

- 邊見亮佑, 山本悠奨, 佐藤隆太: 5 軸制御工作機械における回転軸の以下誤差が加工精度に及ぼす影響の定式化とそれに基づく幾何誤差同定, 日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, (2023, 発表予定).
- 佐藤隆太, 李宗澤: 5 軸制御工作機械における位置決め誤差運動と加工誤差との関係, 日本機械学会 2023 年度年次大会講演論文集, (2023), J131-01.

デュアルコム分光干渉法と両面干渉計による高精度かつ広帯域な固体屈折率測定法の開発

清水 祐公子、尾藤 洋一

産業技術総合研究所 計量標準総合センター

1. 概要

シリコン基板の厚さ測定など、産業界で利用されている分光干渉式厚さ測定システムの精度・信頼性の向上に貢献するとともに、半導体材料などの物性に新たな知見を加えることを目的として、デュアルコム分光計による高精度・広帯域な分光測定と両面干渉計による高精度厚み測定を組み合わせた広帯域かつ高精度な固体群屈折率測定システムの開発に取り組んだ。デュアルコム分光干渉計においては、光コムの特長であるスペクトル安定性向上に取り組む、偏波保持化よりも制御量に対するスペクトル変化を小さくすることが重要であることを見出した。両面干渉計においては、シリコンウェハ及びシリコン材で作製したブロックゲージ寸法の測定を実施し、厚さ 30 mm のブロックゲージに対して不確かさ 11 nm を達成した。

2. 成果発表

清水祐公子、入松川知也、大久保章、稲場肇、2022 年度レーザー学会学術講演会 [E05-19p-IX-01]

膜タンパク質を用いた走査型プローブ顕微鏡の開発

庄司 観

長岡技術科学大学 工学研究院機械系

1. 概要

本研究では、ポア形成膜タンパク質をガラスピペット先端に再構築した生体ナノポアプローブを用いた走査型イオンコンダクタンス顕微鏡(SICM)の開発を目指し、膜割れおよびポア数の変化に応答し自動的に脂質二分子膜を再形成する「脂質二分子膜自動形成システムの開発」および、「生体ナノポアプローブの SICM プローブとしての性能評価」を実施した。脂質二分子膜自動形成システムの開発では、ナノポアを通過するイオン電流値からポア数を計算し、ポアが複数個再構築された場合にプローブを上下動させ脂質二分子膜を再形成するシステムを構築することで、繰り返し脂質二分子膜を形成することに成功した。生体ナノポアプローブの評価では、直径約 10~20 nm のナノポアを構築することが可能な Streptolysin O を再構築した生体ナノポアプローブを開発し、本プローブのプローブ-基板間距離に対するイオン電流変化を観察した。さらに、有限要素法シミュレーションにより本プローブのモデルを構築することで、実験データと比較しプローブの性能を評価した。その結果、生体ナノポアプローブを用いた SICM には従来研究で用いられていた理論モデルが適応できないことが分かり、シミュレーションによるプローブ-基板間距離の補正を実施することで、SICM プローブとして応用可能であることが確認された。上記研究成果は、膜タンパク質を用いた SICM 実現の可能性を示唆する物であり、今後は本システムを用いた細胞計測を実施する予定である。

2. 成果発表

【国際会議】

- 1) H. Ishizuka and K. Shoji, "Automated Lipid Bilayer Formation by Capacitance Feedback Control," 34th 2023 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, Nagoya, (2023.11)
- 2) S. Nomi, R. Yoshihara, and K. Shoji, "Biological Nanopore Probe for Molecular Detection and Topographic Imaging," The 26th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μ TAS2022), On line (10.2022)

【国内会議】

- 1) K. Shoji, "Scanning Ion Conductance Microscopy Using Biological Nanopore Probes," 第 61 回日本生物物理学会年会, 名古屋, (2023.11)
- 2) 石塚洋渡, 庄司観, "自動膜形成システムを用いたハイスループットナノポアセンシング", Cheminas 48, 熊本, (2023.11)
- 3) 喜多村皓太, 能美柊汰, 庄司観, "ダブルバレルピペットを用いた Bio-SICM プローブの開発", 第 35 回バイオエンジニアリング講演会, 仙台, (2023.6)
- 4) 石塚洋渡, 庄司観, "静電容量フィードバックによる人工細胞膜形成システムの開発", Cheminas 47, 仙台, (2023.5)
- 5) 石塚洋渡, 能美柊汰, 庄司観, "ナノポアセンシングの自動化に向けた膜形成位置検出プログラムの開発", 第 6 回分子ロボティクス年次大会, 仙台, (2022.11)
- 6) 能美柊汰, 岡田瞬, 庄司観, "生体ナノポアプローブを用いた段差計測", 第 6 回分子ロボティクス年次大会, 仙台, (2022.11)
- 7) S. Nomi and K. Shoji, "Characteristics of Biological Nanopore Probes as Topological Imaging System," 第 60 回日本生物物理学会年会, 函館, (2022.9)
- 8) 能美柊汰, 吉原諒, 庄司観, "Bio-SICM 応用に向けた生体ナノポアプローブの開発と評価", 2022 年電気化学会北陸支部春季大会, web 開催, (2022.5)

液浸型回転傾斜露光装置の開発

高橋英俊

慶應義塾大学

1. 概要

本研究では、液浸型回転傾斜露光装置の開発について報告する。従来の方法である回転傾斜露光に液浸を導入することで、より大きな傾斜角度を有する構造を形成することが可能になる。装置は、調整可能な2枚のミラーと純水を貯水する貯水槽付きの立方体ガラスチャンバで構成され、回転する。紫外線はミラーとガラスチャンバを反射・通過し、純水中のウェハを傾斜された状態で回転しながら照射する。この装置を用いて、マイクロ吸盤アレイの製作実験を行った。その結果、傾斜角度は最大で 51° に達し、従来の回転傾斜露光装置を上回る傾斜角度での露光が可能になった。

2. 成果発表

公刊学術論文

(1) G. Kagawa; T. Sugimoto; H. Takahashi; Liquid-immersion inclined UV lithography using cube prism and mirrors, Appl. Phys. Express, Vol. 15, No. 11, Article No. 116501, 2022年10月17日掲載
Impact Factor (2021): 2.819.

国際会議発表プロシーディング

(1) G. Kagawa and H. Takahashi, Liquid-immersion inclined-rotated UV lithography for micro suction cup array, Proc. of MEMS 2023, pp. 610-612, Munich, Germany, Jan. 9-13, 2023年1月18日発表済.

国内講演会発表

(1) 香川学斗, 杉本匠, 高橋英俊, 液浸型の傾斜 MEMS 紫外線露光装置の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 札幌コンベンションセンター, 札幌, 2022年6月3日発表済.

(2) 香川学斗, 高橋英俊, 液浸型の回転傾斜露光を用いた紫外線露光装置の開発, 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, アスティとくしま, 徳島, 2022年11月16日発表済.

(3) 香川学斗, 高橋英俊, 液浸型の回転傾斜 MEMS 紫外線露光装置を用いたマイクロ吸盤アレイの製作, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 名古屋国際会議場, 名古屋, 2023年6月30日発表済.

1. 概要

本研究では、弾性流体潤滑(EHL:elasto-hydrodynamic lubrication)条件下において狭小すきま潤滑膜のトライボ特性評価を行うためのハイブリット計測システム(表面プラズモン共鳴と光干渉の同時計測システム)を開発した。同システムを活用することで、例えば、油膜圧力の高速高感度計測、吸着膜分布の in-situ 計測、混合潤滑条件下での表面粗さの油膜圧力増加効果の定量化などが実施可能となる。従来、表面プラズモン共鳴法は金属表面の吸着膜誘電率を高感度に in-situ 計測することが可能であり、吸着膜の摩擦特性の定量化を目指すトライボロジー分野において非常に相性の良い計測手法である。以下の成果発表で報告した通り、本研究では潤滑膜のトライボ特性評価の代表的な手法である光干渉法と表面プラズモン計測の同時計測が簡便な光学システムで実現可能であることを数値シミュレーションおよび油膜圧力計測試験によって実証した。

2. 成果発表

【国際会議発表】(計 3 件)

- [1] Kenta Ochiai, Yuji Tanaka, Satoru Maegawa, Xiaoxu Liu, Fumihito Itoigawa, High Time Resolution Measurement of Pressure Distribution in EHL Using Surface Plasmon Method, International Tribology Conference, Fukuoka, 2023/09
- [2] Kenta Ochiai, Satoru Maegawa, Xiaoxu Liu, Fumihito Itoigawa, High spatial and temporal resolution imaging of pressure distribution of EHL lubricant films based on SPR method, The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, Jeju island, Korea, 2023/03
- [3] Satoru Maegawa, Kenta Ochiai, and Fumihito Itoigawa, In-situ pressure measurements in elastohydrodynamic sliding contacts using surface plasmon resonance method, IndiaTrib-2022: 11th International Conference on Industrial Tribology, New Delhi, India, 2022/12

【国内会議発表】(計 3 件)

- [4] 落合健太, 前川覚, 劉曉旭, 糸魚川文広, 表面プラズモン共鳴法を用いた弾性流体潤滑下での油膜圧力場のその場観察, トライボロジー会議 2023 春 東京, 2023.05
- [5] 落合健太, 前川覚, 劉曉旭, 糸魚川文広, 表面プラズモン共鳴による油膜圧力計測法の粗面 EHL の応用, トライボロジー会議 2022 秋 福井, 2022.11
- [6] 落合健太, 前川覚, 劉曉旭, 糸魚川文広, 表面プラズモン共鳴法を用いた弾性流体潤滑下での油膜圧力場のその場観察, トライボロジー会議 2022 春 東京, 2022.05

電解液フリー電気化学的インプリントリソグラフィによるマイクロ・ナノパターン形成

村田順二

立命館大学 理工学部 機械工学科

1. 概要

本研究では、機能性材料表面に対して常温・大気圧下でのパターンニングを可能とする電解液フリー電気化学的インプリントリソグラフィ技術を開発する。この技術では、従来の電気化学表面処理では必須となる電解液を用いず固体電解質を代替として使用することを特徴とする。パターンを有する固体電解質表面と材料表面を接触させ、両者の界面において発生する化学種により材料表面の改質とその除去を経て微細パターンを施す。レジストを必要とせず難加工性材料を含む半導体や金属など幅広い材料に直接的にパターンを形成できる。また、固体電解質の利用により薬液の使用量を低減でき、洗浄や廃液処理を省力化できる。低環境負荷かつ安全性の高いサステナブルなパターンニング法を実現し、得られた機能材料表面を応用可能性について検討した。

2. 成果発表

1. P. Jia, R. Umezaki, J. Murata, Direct micropatterning on a titanium surface through electrochemical imprint lithography with a polymer electrolyte membrane stamp, *Microelectronic Engineering*, 257 (2022), 111752
2. Junji Murata, Kenshin Hayama, Masaru Takizawa, Environment-friendly electrochemical mechanical polishing using solid polymer electrolyte/CeO₂ composite pad for highly efficient finishing of 4H-SiC (0001) surface, *Applied Surface Science*, 625 (2023), 157190
3. A. Tsuji, J. Murata, Direct Micropatterning of Cu Using Polymer Electrolyte Membrane Stamp, *Int. Conf. Prec. Eng. Sustain. Manuf.*, Okinawa, Japan, 2023, pp. PP1-010.
4. 山崎克真, 辻淳喜, 村田順二, 固体電解質膜を用いた電気化学インプリントにおけるパターン精度の向上, 2023年度精密工学会春季学術講演会, 福岡工業大学
5. 辻淳喜, 村田順二, 固体電解質のイオン輸送を用いたCuの全固相電気化学パターンニングにおける加工条件の影響, 2023年度精密工学会春季学術講演会, 福岡工業大学

※国内学会 他多数