

準拠したメカニズムと非ニュートン流体による研磨ヘッドの設計と実装

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科
ブカン アントニー

1. はじめに

超精密旋削および研削は広く使用されている技術であり、光学面を高精度（形状 $< 100 \text{ nm}$ P-V、粗さ $< 1 \text{ nm Ra}$ ）で成形できる。超音波やレーザーアシストなどのハイブリッド加工技術の出現により、ニッケル合金、ステンレス鋼、タングステンカーバイドなどを含むさまざまな基板材料で利用できるようになった[1, 2]。図 1 に示すように、自動車用の高精度光学部品（ヘッドライトおよびヘッドアップ ディスプレイの金型）、マイクロ レンズ アレイなどのフリーフォーム オプティクス、最近では拡張現実（AR）、仮想現実（VR）、光検出および測距（LIDAR）の応用が含まれる。

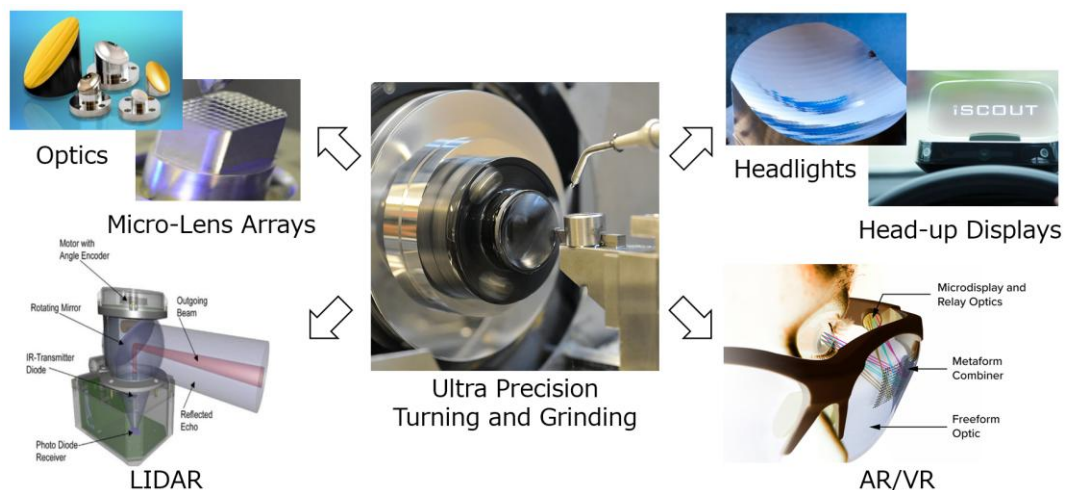


図 1 . Applications of ultra-precision turning and grinding

しかし、この技術の欠点は、ダイヤモンド工具が回転する工作物の表面を旋削加工する際に、切削痕が繰り返されることである。表面に生成された格子状の微細パターンが回折を引き起こし、衛星画像点が現れる[3]。この効果は一部のアプリケーション（例：照明目的のヘッドライト金型）では無視できるが、ほとんどのイメージングおよびセンシング アプリケーションでは、これらの回折効果が最終システムの性能に深刻な影響を与える可能性がある。したがって、ダイヤモンド切削部品の後研磨を可能にする「プラグアンドプレイ」システムが必要である。

2. 研究プロジェクトの目的

せん断応力研磨は、非接触仕上げ方法としての可能性について近年研究されてきました[4, 5]。図 2 に示すように、その研磨液は、デンプン、ポリマー、研磨剤で構成されている。

デンプン分子は、流体がせん断されるとハイドロクラスターを形成し、スラリーを硬化させ、ワーク表面上を移動する研磨粒子に負荷を与える。したがって、工作物表面は、工具からの実際の接触を必要とせずに研磨することができる。

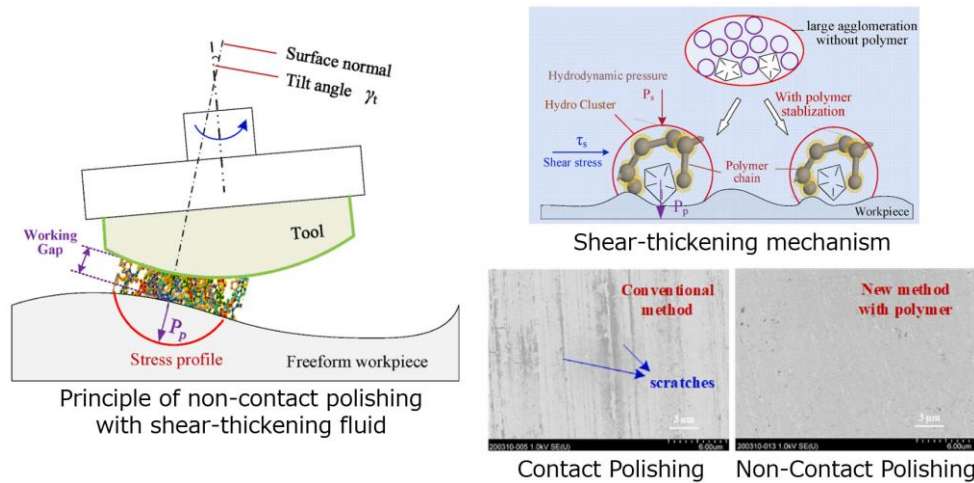


図 2. Principle, mechanism, and typical results of polishing process with shear-thickening fluid

ただし、超精密ダイヤモンド旋削加工（マイクロ レンズ アレイやフレネル レンズなど）によって作成される多くの光学コンポーネントの典型的な特徴と比較すると、このプロセスに必要な工具サイズはかなり大きい（半径 10 mm）。この問題を解決するために、別の研究グループが切削に使用されるのと同じダイヤモンド工具を使用して超精密旋盤で直接研磨することを提案した[6]。旋盤には高速ツールサーボが装備されている。ワークと工具の隙間に非ニュートン流体を供給しながら、面に対して垂直方向に工具を振動させることができるシステムである。これらの条件下で、スラリーは硬化し、表面を研磨する。このプロセスの実装によりほとんどの機械加工痕を除去できるが、最終的な表面測定ではまだいくつかの残留スクラッチが見える。これは、研磨剤の動きが実際には切削痕の方向と一致しているためである。この研磨方向は、切削痕の除去には非効率であり、研磨中に時折発生する微細な研磨傷の方向性にもつながる。したがって、切断マークを横切って研磨できる機構を開発することが望まれる。

図 3 に切断に使用される 2 自由度システムの（2-DOF）1 つの例を示す[7]。このようなシステムは、コンプライアント メカニズムの反対側を押す 2 つのピエゾアクチュエータで構成される。両方のアクチュエータを押すか、一方が押しもう一方が引くかに応じて、2 つの異なる方向のモーションを生成できる。本研究プロジェクトでは、図 4 に示すように、3 つのピエゾアクチュエータを備えた完全に独自の設計が提案され、直交する 3 方向に工具の動きを生成できる。その 3 つの自由度は、工作物表面に接する平面内での工具の動きを可能にし、工具を周期的またはリサージュ経路で連続的に動かすために使用される。研磨方向を変化させ、切削痕の除去を強化できる[8]。この目的を達成するために、本研究では、小型工具先端を搭載した圧電トランスデューサ駆動の 3-DoF コンプライアント機構（CM）の開発を提案する。コンプライアント機構は、トポロジー最適化（TO）技術によって設計および最適化される。開発されたデバイスを使用して、ダイヤモンド旋削されたニッケル表面の研磨が

行われる。表面劣化および切削/傷跡の除去能力の点で、1-DoF 動作と比較した 3-DoF 工具先端動作の優位性が確認されている。

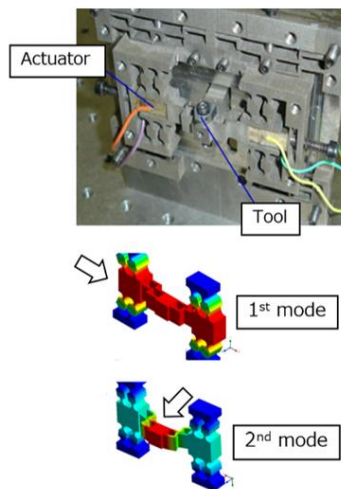


図 3 . Example of 2-DOF system

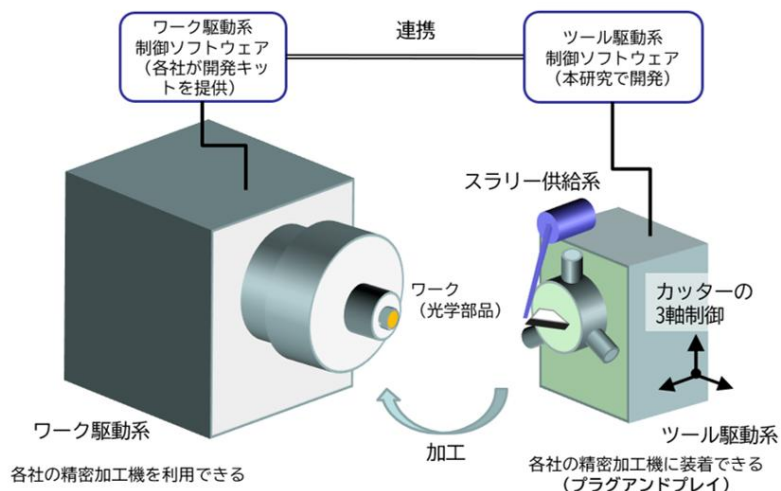


図 4 . Proposed 3-DOF polishing system

3. システムの設計

3 自由度準拠のメカニズムは、トポロジー最適化 (T0) によって設計されている。設計領域と境界条件の概念図を図 5 に示す。初期の設計領域は $36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$ の正方形で、境界 5、7、9、11 の長さは 6 mm である。境界 9 は、ジオメトリを固定位置に固定する。境界 7 と 11 に等しい押す力を入力すると、境界上の各点の変位は u になる。トポロジ最適化 (T0) の目的関数は次のとおりです：

$$\min_{\rho} J(\rho) = - \int_{\Gamma_{\text{out}}} t_{\text{out}} \cdot u d\Gamma \quad (1)$$

ここで $t_{\text{out}} = (0, 1)$ であり、 ρ は材料密度分布関数である。この関数は、加えられた力の下でヘッドの変位 (図の境界 5) が最大になるときに最小値に達する。また、変位が発生する境界でのバネの復元力を考慮することで、機構の剛性の影響を組み込むことができるバネモデルも適用される[9]。次に、次の条件を式 1 に付加することができる。

$$\begin{aligned} s. t. \quad & -\nabla \cdot (E: \varepsilon(\mathbf{u})) = 0 && \text{in } D \\ & \mathbf{t} = \mathbf{t}_{\text{in}} - k_{\text{in}} \mathbf{u} && \text{on } \Gamma_{\text{in}} \\ & \mathbf{t} = -k_{\text{out}} \mathbf{u} && \text{on } \Gamma_{\text{out}} \\ & \mathbf{u} = 0 && \text{on } \Gamma_{\text{u}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 k_{in} と k_{out} は機構の入力と出力の剛性の目標値である。トポロジー最適化 (T0) は設計変数を更新することで目的関数の最小化を実現する。本研究では反応拡散方程式に基づく T0 を採用している[10, 11]。図 6 は、1 回目と 20 回目の反復後の最適設計の進化を示し

ている。青い領域は材料が存在しない領域、赤い領域は材料が存在する領域を示す。最終的に最適化されたフォークのような形状は 3D モデルに変換され、製造用に CAD にエクスポートされました。

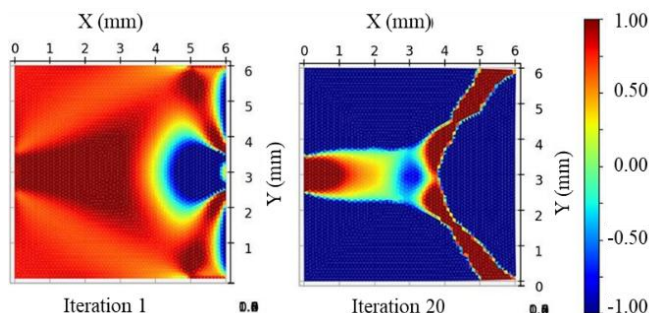
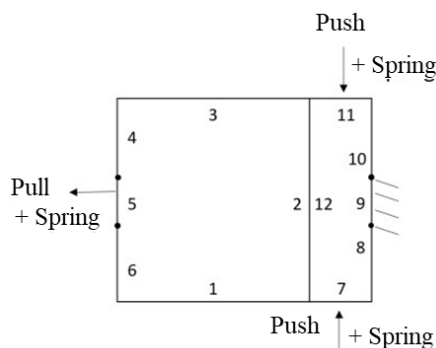


図 5. Design domain and boundaries

図 6. Topological optimization of compliant mechanism

3. 実験的検証

コンプライアントメカニズムの形状は、設計と比較して正確な剛性を確保するために、アルミニウムの単一のインゴットから切り出されました。ワイヤを軸方向に通して平行六面体を切り出し、その後、図 7(a)に示すように、個々の平行六面体上でトポロジカル形状を切り出しました。実際に製造された CM を図 7(b)に示す。直径 $\Phi 2$ mm の平らな先端がコンプライアントメカニズムの上部にねじ込まれ、研磨ツールとして機能する。先端に動きを与えるために、図 7(c)に示すように、3つの圧電素子（モデル：PZA12-3T、メーカー：マツダ）がコンプライアントメカニズムの3本の脚に取り付けられている。先端を Z 方向と X-Y 方向に動かすために、コントローラ（モデル：Microlab box 1202、メーカー：dSPACE）を使用して、トランスデューサを駆動するアンプに正弦波信号を送信しました。トランスデューサーに送られる複数の信号を追加およびバイアスすることで、希望する振幅と周波数で先端の 3-DoF 振動運動が生成される。先端の実際の動きを評価するために、共焦点クロマティック センサー（メーカー：micro-epsilon）を使用して軸方向および半径方向の変位を測定しました。

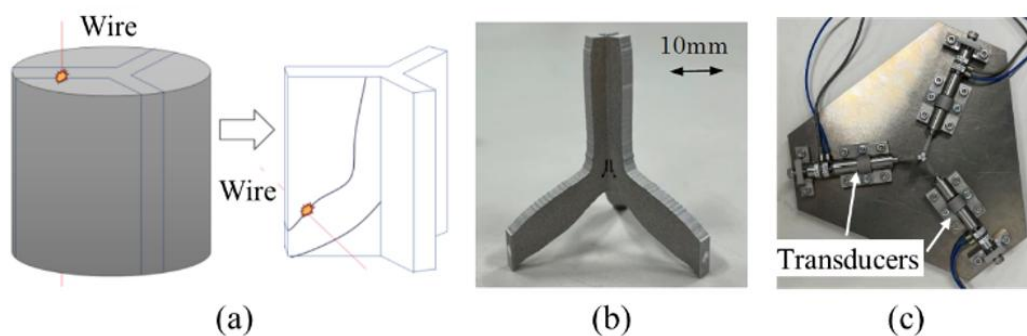


図 7. (a) Strategy for wire-EDM cutting of compliant mechanism, (b) fabricated mechanism, and (c) assembly of mechanism and piezoelectric transducers

図 8 に示すように、準備した研磨装置を超精密旋盤（メーカー：Moore Nanotech）内に設置した。ダイヤモンド旋盤で無電解ニッケルメッキの平面サンプルを作製し、初期表面粗さを測定した結果、図 10 (a) に示すように、 0.24 nm Ra であった。次に、50wt%の増粘剤と #30,000 アルミナ粒子を 40g/L の濃度で含む非ニュートン混合物を供給しながら、ワークピースを 100RPM で 5 分間回転させて表面を研磨した。研磨ヘッドは静止した位置に留まり、表面に溝を生成した。1 自由度と 3 自由度の両方のモーションを入力し、最先端システム [6] に対する新システムのメリットを確立した。

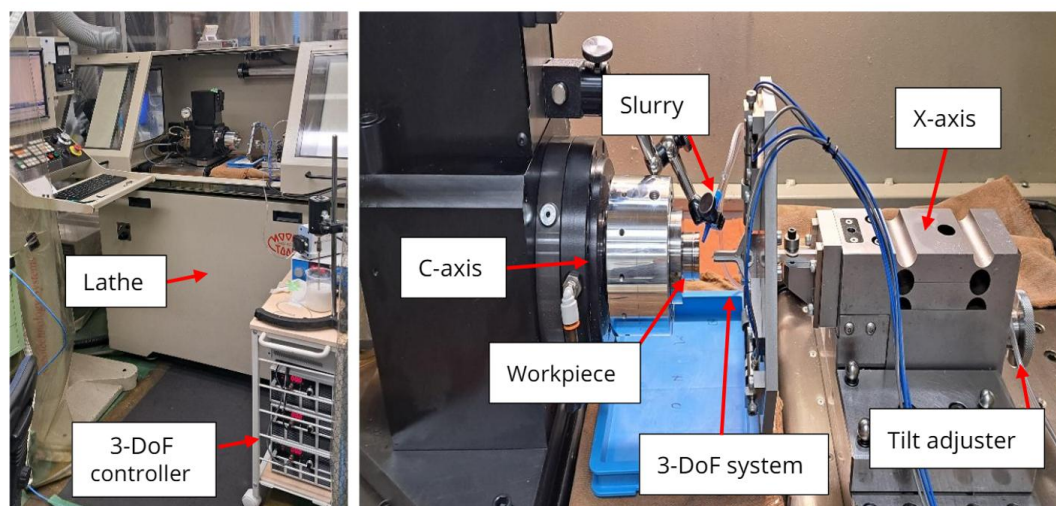


図 8 . 3-DoF system as mounted inside the ultra-precision lathe

4. 実験結果

まず、電気入力と変位の関係を明らかにしました。図 9 に、時間の関数としてのツール先端の変位を示す。軸方向では、変位率が $4 \mu\text{m/V}$ で、滑らかな正弦波の外観が観察されました。半径方向では、変位率は $5 \mu\text{m/V}$ で、シーソー関数に似ている。半径方向の動きがシーソーのように見える理由は調査中ですが、実際には軸方向と半径方向の間のクロストークはほとんどないため、この状態でもこのメカニズムは 3-DoF 研磨に使用できる。

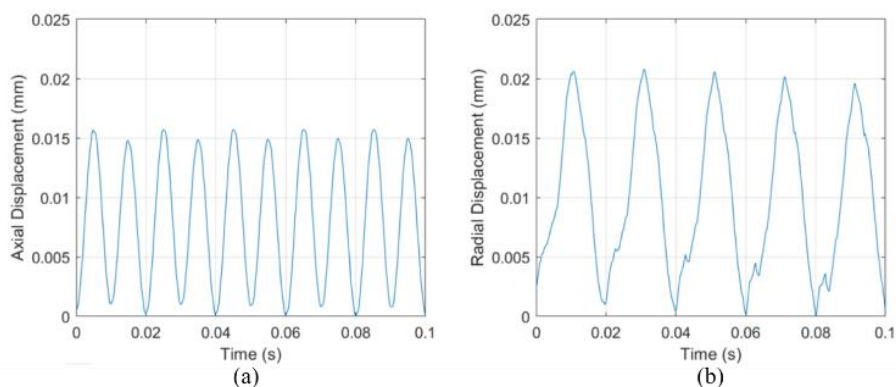


図 9. (a) Axial and (b) radial displacement of the tip,
by signal superposition: 200Hz (in-phase) and 99Hz (out-phase)

ダイヤモンド旋削されたニッケルサンプルの研磨は、50 重量%の増粘剤を含む非ニュートンスラリーを使用して実施されました。表面は、次の 2 つの条件で研磨されました。

- I. 1 自由度研磨：研磨チップは Z 方向にのみ作動しました（周波数：1000 Hz、振幅：10 μm ）。
- II. 3 自由度研磨：研磨チップは Z 方向に作動しました（周波数：1000 Hz、振幅：10 μm ）。また、X-Y 方向には準円運動しました（周波数：100 Hz、振幅：40 μm ）。

3 つの高周波（1000 Hz）同位相信号が軸方向（Z 方向）にコンプライアント機構のチップを動かし、繰り返し衝撃を受けるとせん断増粘現象によって非ニュートンスラリーが硬化する。3 つの低周波（100 Hz）120 度位相ずれ信号が、コンプライアントメカニズムの先端を放射状（XY 平面）に動かし、円形の材料除去フットプリントを生成する。

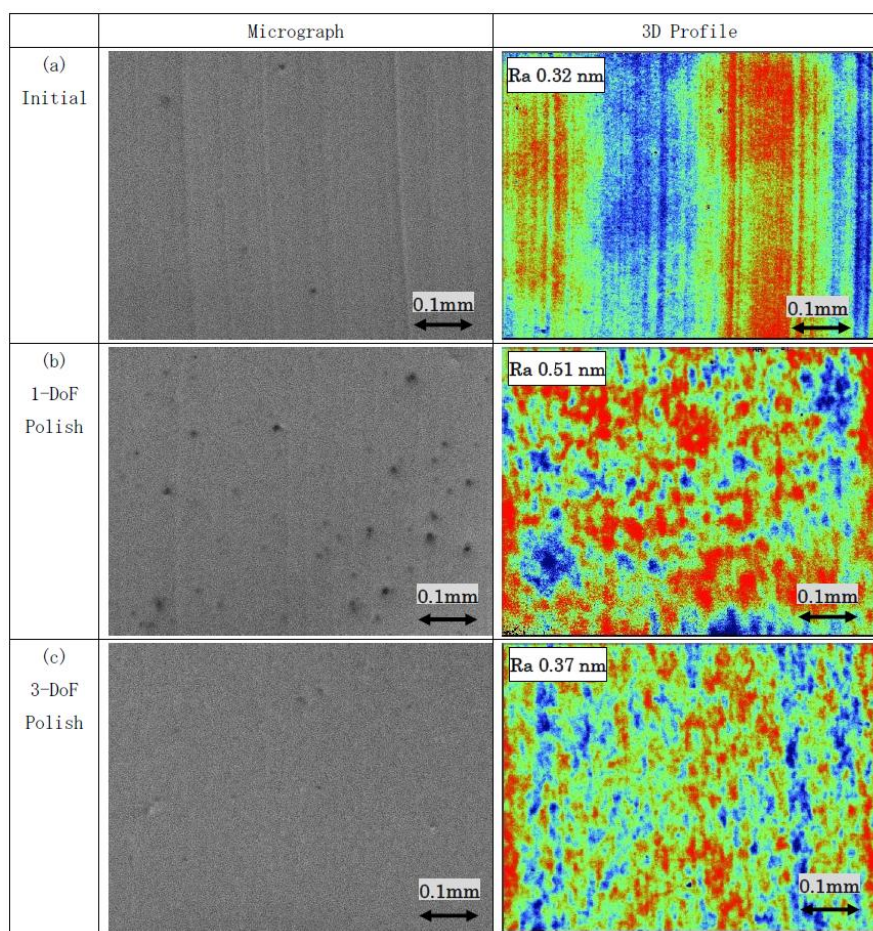


図 10. Comparison of surface condition (a) before and after polishing with (b) 1-DoF and (c) 3-DoF motion of the compliant mechanism.

1-DoF および 3-DoF の先端動作の両方で研磨された溝では、5 分後に約 10 nm の除去深さが達成されました。図 10(b) に示すように、1-DoF 研磨後も表面にかすかな切断線が残っていました。これは、文献で以前に報告された結果と一致している [6]。表面には高密度のピ

ットも見られ、表面粗さが 0.51 nm Ra に大幅に増加しました。横方向の先端動作がないと、研磨ギャップ内の非ニュートン流体の流体力学的妨害が増加し、表面を損傷する可能性のある大きな流体力学的クラスターが形成されると考えられる [12]。この仮説は、今後の研究のテーマになる。比較すると、図 10(c) に示すように、3-DoF 研磨を使用した場合、表面から切削痕がほぼ完全に除去されました。また、初期の表面状態と比較して、顕著なピットも見られませんでした。これは、研磨ギャップ内に大きな流体力学的クラスターが形成されなかったことを示している。表面粗さの平均は、0.37 nm Ra でほぼ維持されていることがわかりました。

4. 結論

この研究では、圧電駆動の 3-DoF 研磨ヘッドを設計し、テストしました。2D ドメインでトポロジー最適化を実行し、3D コンプライアント メカニズムの形状を確立しました。メカニズムの Z 方向および X-Y 方向の動きは、メカニズムに接触するトランスデューサーに同相および異相の正弦波信号を送信することで実現しました。ニッケル サンプルで研磨実験を行い、ヘッドが 1-DoF および 3-DoF で振動したときの表面粗さを比較しました。研磨実験では、3-DoF での先端の動きによって、ダイヤモンドの切削痕がより効果的に除去され、表面仕上げが劣化しないことが示されました。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野財団と NEDO から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示す。超精密旋盤へのシステム組み込みについては、株式会社イネイブルの技術サポート、また、また、トポロジカル最適化問題の設定に関しては、京都大学の古田幸三助教にアドバイスも評価されている。

参考文献

- 1) Wang S, Kong L, Wang C, Cheung C, “Ultra-precision manufacturing of microlens arrays using an optimum machining process chain,” *Optics Express*, vol. 31, no. pp. 2234, 2023
- 2) Pizani PS, Jasinevicius R, Duduch JG, Porto AJ V, “Ductile and brittle modes in single-point-diamond-turning of silicon probed by Raman scattering,” *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 8, pp. 1185–1187, 1999.
- 3) Tamkin JM, Dallas WJ, Milster TD, “Theory of point-spread function artifacts due to structured mid-spatial frequency surface errors,” *Applied Optics*, Vol. 49, pp. 4814, 2010.
- 4) Zhu W-L, Beaucamp A, “Non-Newtonian fluid based contactless sub-aperture polishing,” *CIRP Annals* Vol. 69, pp. 293–296, 2020
- 5) Li M, Liu M, Riemer O, et al, “Origin of material removal mechanism in shear thickening-chemical polishing”, *Int Journal Machine Tools and Manufacture*, Vol. 170, pp.103800, 2021.
- 6) Zhu Z-H, Huang P, To S, et al, “Fast-tool-servo-controlled shear-thickening micropolishing,” *Int Journal Machine Tools and Manufacture*, Vol. 184, pp. 103968, 2023.

- 7) Zhu Z, Zhou X, Liu Z, et al, "Development of a piezoelectrically actuated two-degree-of-freedom fast tool servo with decoupled motions for micro-/nano-machining," *Precision Engineering*, Vol. 38, pp. 809–820, 2014.
- 8) Beaucamp A, Namba Y, "Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing," *CIRP annals*, Vol. 62, No. 1, pp. 315-318, 2013.
- 9) Bianchi G, Solenthaler B, Székely G, Harders M, "Simultaneous topology and stiffness identification for mass-spring models based on FEM reference deformations," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 293–301, 2004.
- 10) Ishida N, Kondoh T, Furuta K, et al, "Topology optimization for maximizing linear buckling load based on level set method," *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 9, pp. 21–00425, 2022.
- 11) Choi JS, Yamada T, Izui K, et al, "Topology optimization using a reaction–diffusion equation," *Computer Methods Applied Mechanical Engineering*, Vol. 200, pp. 2407–2420, 2011.
- 12) Cui X, Wang H, Ye L, Fu K, "Numerical simulation of shear jamming in a shear thickening fluid under impact," *Rheologica Acta*, Vol 62, No. 4, pp. 225-238, 2023.