

透過レーザーを用いた熱収縮性プラスチックの加熱面制御による山折り・谷折り加工

今野 陽斗^{*} 渡邊 恵太[†]

概要. レーザーカッターの加工は平面形状の制作に特化しているため、3D 作品を制作するには切り出したパーツを組み立てる必要がある。この組み立て作業はパーソナルファブリケーションの場合、手作業で行われることが多く、作業の速度や精度、安定性など制作者の技術に依存するため、作品の品質にばらつきが生じる。この問題に対し、熱収縮性プラスチックに局所的な加熱を行うことで、平面を3D 曲面へと変形させるレーザーカッターによる曲げ加工手法がある。この手法により、従来は成形が困難であった3D 形状を組み立て作業なしで実現でき、制作者の技術に依存しない一貫した品質の作品制作ができる。しかし、既存の曲げ加工手法では加工対象の性質上、曲げ方向が単一に限定される問題がある。そこで本研究では、透明な熱収縮性プラスチックに対して黒トナーを付与することで、山折り・谷折りを自由に切り替えることができるレーザーカッターによる曲げ加工手法を提案する。本手法により、レーザーカッターを拡張せずに、従来の曲げ加工では成形が困難であった複雑な形状を作ることができる。

1 はじめに

レーザーカッターは、速度・精度・素材適合性に優れ、個人の試作から産業の現場までデジタルファブリケーションの基盤として広く用いられる装置である。そして、パーソナルファブリケーションにおいて、3D プリンタと並ぶ中核的な装置である。

一方で、レーザーカッターの出力は基本的に平面形状に限定されるため、立体物の制作には複数の平面パーツを切り出し組み立てる必要がある。この段取りは部品数に比例して工程が増加し、作品の品質が制作者のスキルに大きく依存する問題がある。

この制約に対し、熱収縮性プラスチックを局所的に加熱し、平面素材を立体へ変形させる手法が提案されている [3]。この手法では、局所的に加熱することで反りが生じる素材に対し、レーザーカッターで局所的な加熱を行い素材を曲げている。この曲げ加工により、組み立て作業を省略し立体物を出力でき、制作者の技術に依存しない一貫した品質の作品を制作できる。

しかし、既存手法では、曲げ方向がレーザーの照射面に依存するため、素材は一方向にしか曲げることができない。曲げ方向を制御するためには、裏面側にレーザー光を照射する必要があるが、レーザーカッターの拡張は安全対策や装置構成の複雑さから、個人環境での導入コストが高く、パーソナルファブリケーションへの適用は難しい。

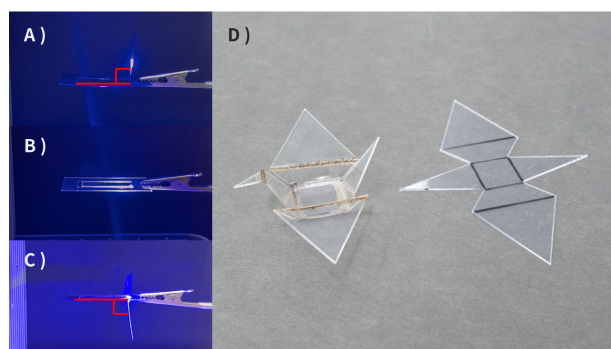


図 1. レーザーカッターによる山折り・谷折り手法: (A) トナー塗布表面 (谷折り); (B) トナー塗布なし (透過); (C) トナー塗布裏面 (山折り); (D) 作例: 鶴と鶴の展開図

本研究では、照射面を固定したままトナー付与面の選択によって、曲げ方向を制御する新たなレーザーカッターによる曲げ加工手法を提案する (図 1)。本手法では、透明な熱収縮性プラスチックに対し、吸収されにくい波長のレーザーを使用する。また、照射部位にレーザープリンタの黒トナーを選択的に付与することでレーザーを局所的に吸収させ、温度勾配を発生させる。トナーを表面側に定着させると表面温度が優位となり谷折りができ、裏面側に定着させると裏面温度が優位となり山折りができる。これにより、レーザーカッターの拡張をすることなく、レーザーカッター単体でより自由度の高い形状を制作できる。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

^{*} 明治大学大学院先端数理科学研究科

[†] 明治大学総合数理学部

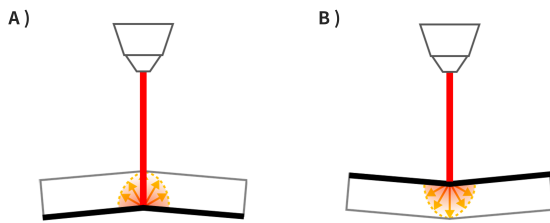


図 2. 山折り・谷折り加工のイメージ図: (a) 山折り（裏面塗布）; (b) 谷折り（表面塗布）

2 従来の曲げ加工とその課題

従来のレーザーカッターによる曲げ加工は、熱収縮性プラスチックの局所収縮を利用することで谷折りを実現している。この素材は、全面的な加熱では全体が収縮するが、局所的な加熱では収縮勾配が生じ、素材が反る。その結果、レーザーを照射した側に向かい谷折りが生じる。

しかし、素材の特性上、曲げ方向を谷折りに限定されている。レーザーカッターが直接加熱できるのは一般的に表面側のみであり、照射面に依存した一方向にしか曲げることができない。

この制限を解消するには、裏面側にもレーザー光を供給し、山折りを実現する必要がある。両面照射を実現するには、下方から照射できる専用レーザーカッターを用いるか、レーザー光を反射させ裏面に導く機構を導入する必要がある。これは安全対策や装置構成の複雑さから、個人環境での導入コストが高く、パーソナルファブリケーションへの適用を妨げている。

3 山折り・谷折り手法

本手法は、透明な熱収縮性プラスチック、素材に吸収されにくい波長のレーザー光、黒トナーの転写の3要素から構成される。この組み合わせにより、レーザーカッターの拡張なしに山折りと谷折りの両方を同一素材上で実現する。

加工対象は透明な熱収縮性プラスチックである。熱収縮を局所的に起こすことで素材を曲げる点は従来手法と同様だが、裏面側にレーザー光を供給するために、素材は照射波長域で高い透過率を有している必要がある。本手法では、レーザー光が素材を透過することで裏面側にエネルギーを供給する。

照射には素材の吸収帯外にある波長のダイオードレーザーを用いる。この波長を使うことで、素材はレーザー光をほぼ透過し、未処理部は加熱されず熱収縮が起きない。一方、黒トナーは広帯域にわたり吸収が高いため、トナーが付与された部位のみがレーザー光を吸収して発熱する。本研究では市販のダイオードレーザー加工機（xTool F1）を使用した。

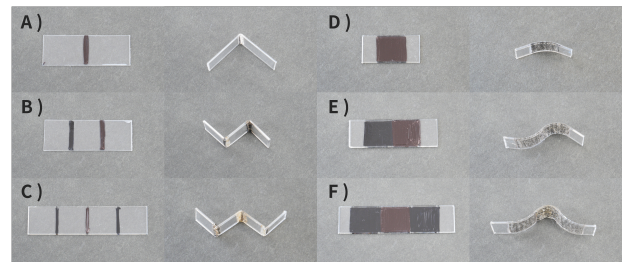


図 3. トナーの付与模様と折り方の違いが曲げ角度に与える影響の調査: (A-C) 線状付与; (D-F) 面状付与

本手法では、前処理として加工予定線に沿って黒トナーを素材表面に付与し定着させる。トナーを裏面側に定着させ、表面側からレーザー光を照射すると、レーザー光は素材を透過して裏面側のトナーに吸収され発熱する。その結果、裏面側が高温になることで収縮が優位となり、素材が山折りとなる（図 2.a）。反対に、トナーを表面に定着させ同様にレーザー光を照射すると、表面側が高温となり熱収縮が起きるので、素材が谷折りとなる（図 2.b）。

加工条件はレーザーの走査速度とパス回数で制御し、折れる角度を調節する。この時に使用したパラメータは、Kan らの条件を参考にした [1]。また、折り方向の切り替えには、トナーの付与面を選択することで切り替える。レーザープリンタを用いた熱収縮性プラスチックに対するトナーの付与は、Liu らの研究を参考にした [2]。

4 議論

トナーの付与模様が、曲げ角度に与える影響を調査した。図 3.A-C は、線状にトナーを塗布し、図 3.D-F は面状にトナーを付与し、山折り・谷折りでレーザー出力・走査速度・パス回数を同一に設定した。

結果として、線状塗布では山折りと谷折りの曲げ角に顕著な差は認められなかったのに対し、面状塗布では谷折りの方が一貫して大きな曲げ角を示した。

この要因として、トナー層に到達するレーザーエネルギーに差があると考えられる。谷折りでは入射面側にトナーが存在し、入射直後に光エネルギーが熱へと変換されるため、反射・透過・散乱・焦点ずれによる損失が最小化される。一方、山折りではレーザーが素材を透過した後に裏面トナーで吸収されるため、素材内部での吸収、界面反射による損失、シート厚に伴う焦点位置のずれにより、到達エネルギー密度が低下する。

今後は、山折り用と谷折り用に独立したパラメータモデルを構築する。最終的には、各折り方に適した推奨パラメータと設計手順を公開し、異なる装置・素材に対する再現性を高めることで、本手法の実用性を向上させる。

参考文献

- [1] F. Kan, H. Xu, Y. Zhou, K. Li, and J. Hu. Research on Multi-Orbital Scanning Laser Bending Process of Polyvinyl Chloride Sheets. *Coatings*, 15(5), 2025.
- [2] Y. Liu, M. Miskiewicz, M. J. Escuti, J. Genzer, and M. D. Dickey. Three-dimensional folding of pre-strained polymer sheets via absorption of laser light. *Journal of Applied Physics*, 115(20):204911, 05 2014.
- [3] 今野陽斗, 渡邊恵太. LaserBend：熱収縮性プラスチックを用いたレーザーカッターによる曲げ加工. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2024 論文集, pp. 210–218, 2024.