

形状誤差予測によるマイクロレンズアレイ加工の高精度化

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○佐藤裕亮 ◎関 紀旺

要 旨

スローツールサーボを用いたマイクロレンズアレイの旋削加工では、工具形状誤差や設置誤差、加工機の追従遅れなどにより加工誤差が発生する。従来、加工面の全面計測に基づく補正加工が行われているが、非効率的である。そこで、部分測定での誤差要因分析に基づき加工面全面の形状誤差を予測し、事前に誤差補正を行う手法を提案した。これにより、短時間で RMS 10 nm 以下の精度で誤差予測が実現され、加工精度の向上を可能にした。

1. 結論

マイクロレンズアレイは小型レンズを大量集積した自由曲面光学素子であり、多様な光学機能を有するため、航空宇宙やセキュリティなど幅広い分野で用いられている⁽¹⁾。マイクロレンズアレイの加工法の一つである超精密旋削は、スピンドル回転と工具運動を同期させるスローツールサーボ(STS)機構を用いることで、非軸対称な自由曲面形状であっても短時間かつ高精度で加工することができる。しかし、STS 旋削加工では複数の誤差要因により理想形状と実際の加工形状の間に誤差が発生する。そのため、形状誤差を計測し、補正することが必要不可欠である。

従来、加工面の全面測定から形状誤差を算出し、補正加工を行ってきた。しかし、全面測定は長時間を要する。また、補正加工中に工具の追従遅れなどによる誤差が変化するため、高い形状精度を達成することが極めて難しい⁽²⁾。したがって、形状誤差を引き起こす誤差要因に焦点を当て、それを個別に排除することで形状誤差を抑制する必要がある。そこで本研究では、加工面の部分測定と工具運動の測定を用いた形状誤差予測法を提案した。この方法では加工面の一部だけを測定することで全面の形状誤差を短時間で予測することができる。また予測の過程で、各誤差要因が形状誤差に与える影響度を明らかにすることができる。これにより、誤差要因の排除や切削条件の最適化が可能となり、マイクロレンズアレイ加工の高精度化と高速化が期待される。

2. 形状誤差予測法の提案

STS 旋削加工は図 1 に示すように、X、Z 軸の直線運動と C 軸の回転運動を同期させることで自由曲面を創成する。誤差要因は主に工具誤差と機械誤差に分類される。本研究では、図 2 に示すシステムを用いて複数の誤差要因に基づいて形状誤差の予測を行う。具体的には、加工面の部分測定と工具運動の測定を用いて誤差要因を算出した後、全面の形状誤差を予測する。この方法を用いれば、短時間で全体の形状誤差を分析することが可能である。

2.1 工具誤差

工具誤差はさらに工具位置誤差と工具形状誤差に分けられる。工具位置誤差はスピンドルの回転中心に対して、工具先端が X 軸・Y 軸方向にそれぞれずれることで生じる誤差である。また工具形状誤差は工具のノーズ半径の設計値と実際値の誤差である。工具誤差によって生じる加工誤差は幾何学な対称性を持つ⁽³⁾。この対称性を用いれば、加工面の部分測定結果から各誤差量を算出し、全体の形状誤差を予測することが可能である。

2.2 機械誤差

機械誤差は、複雑な工具軌跡や工具の追従遅れなどにより、プログラミングした工具軌跡と実際の工具軌跡の間に生じる追従誤差によって発生する。本研究では加工時に工具指令座標と工具の実際位置を測定することで、追従誤差を算出した。

2.3 形状誤差予測

誤差要因の分析結果を基に、MATLAB による数値計算を用いて加工面全面の形状誤差を予測した。また、各誤差要因が引き起こす形状誤差の二乗平均平方根 (Root Mean Square : RMS) を比較することで、形状誤差における各誤差要因の影響度を求めた。

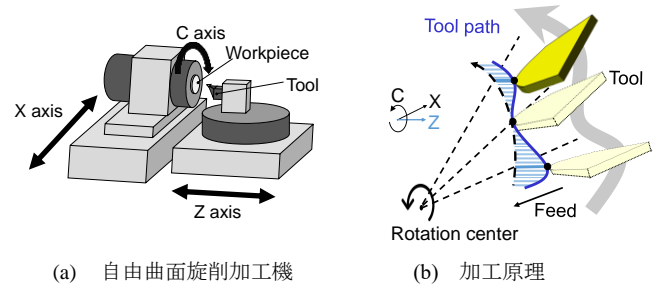


図 1 STS 旋削加工の原理図

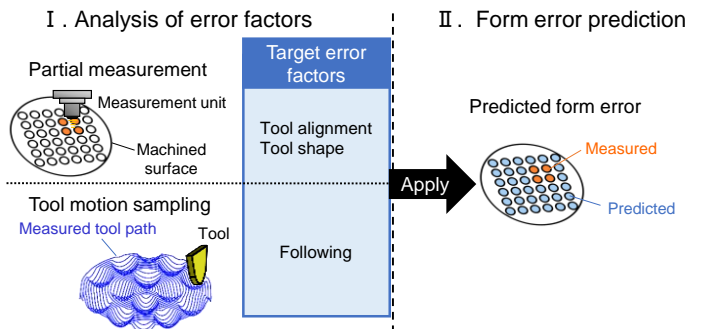


図 2 提案する形状誤差予測システム

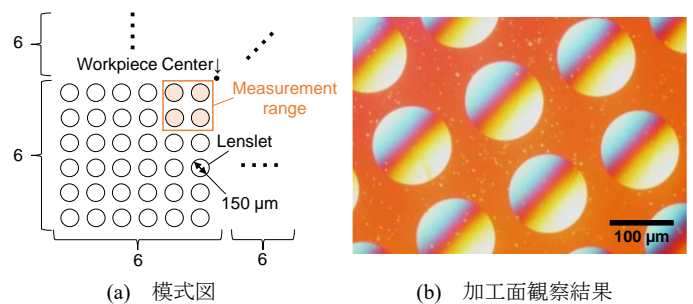


図 3 加工形状の模式図と加工面測定結果の一例

3. 実験方法と装置

加工機には自由曲面加工機 NanoformX(AMETEK 製)を用い、工具にはノーズ半径 0.317 mm、すくい角 0°の単結晶ダイヤモンド R パイトを、被削材には真鍮を用いた。切削条件は、回転数 10 rpm、送り量 1 μm/rev、切込み量は 1 μm とした。加工形状の一例を図 3 に示す。レンズ個数 12×12 の凹球面レンズアレイであり、各レンズの直径および深さは 150 μm、5 μm である。

測定には白色干渉計 Talysurf CCI1000 (AMETEK 製)を用いた。図 3 に示すように 4 つのレンズを含む範囲で測定を行った。工具

運動は、加工機の各軸のガラススケールから測定した。今回はサンプリング周波数を 500 Hz に設定して加工中の工具運動を測定した。

4. 結果および考察

4.1 誤差要因の算出結果

図4はワーク中心から 0.38 mm 離れたレンズにおいて分析された工具位置誤差により生じる形状誤差である。工具位置誤差は Δx と Δy がそれぞれ $-0.60 \mu\text{m}$ 、 $-1.60 \mu\text{m}$ と算出された。図5は工具形状誤差の分析結果であり、85.6 nm P-V となった。図6に工具運動の全面測定によって算出した追従誤差の一部を示す。なお、今回は切削を行わず、空運転にて測定を行った。

4.2 形状誤差予測結果

図7にワーク中心から 1.4 mm 離れたレンズにおける形状誤差の予測結果と実際の形状誤差を示す。形状誤差量だけでなく、その分布が正確に予測できていることが分かる。図8に複数のレンズにおける形状誤差の予測結果と予測精度を示す。予測誤差は予測形状誤差と実形状誤差の偏差の RMS として、どのレンズにおいても 10 nm 以下であった。一般に可視光レンズに求められる形状精度は 100 nm P-V 程度であるため、この予測精度はそれと比べて十分に高いと言える。また、白色干渉計を用いた非接触部分測定に要した時間は2分間であった。一方、従来法でワーク全面を非接触部分測定する場合、計測時間は約 70 分であり、接触式を用いる場合はさらに時間を要する。つまり、本手法を用いることで加工面測定に要する時間が 97%短縮された。

図9にレンズごとの各誤差要因の形状誤差への影響度を示す。各誤差要因の影響度はレンズの位置によって異なることが分かった。工具形状誤差はレンズ位置に依らず影響度がほぼ一定であったのに対し、工具位置誤差と追従誤差はレンズ位置によって影響度が変化した。ワーク中心付近のレンズでは工具位置誤差の影響度が大きいことが分かる。これは工具位置誤差によって切削点が移動するが、ワーク中心に近づくほど、レンズ内に位置する切削点がより広範囲に疎に分散するためであると考えられる。また、ワーク外縁付近のレンズにおいては追従誤差が支配的であった。これはワーク外縁付近で切削速度が増加し、加工機の Z 軸運動の加速度が大きくなったためであると考えられる。

このように形状誤差における各誤差要因の影響度を明らかにすることで、誤差要因の個別排除や切削条件の最適化を効率的に進めることが可能となった。

5. 結論

STS 旋削を用いたマイクロレンズアレイの加工において、加工面の部分測定に基づく形状誤差予測法を提案し、加工実験によって検証を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 加工面の部分測定及び工具運動測定により、形状誤差の主要因を分析し、全体の形状誤差を RMS 10 nm の精度で予測することができた。
- (2) 形状誤差予測によって、測定時間が大幅に短縮された。
- (3) 形状誤差における各誤差要因の影響度を可視化することに成功した。

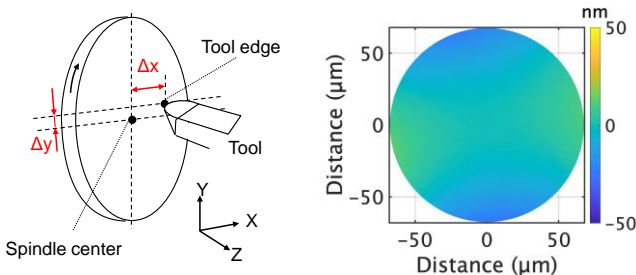


図4 工具位置誤差の模式図と算出結果

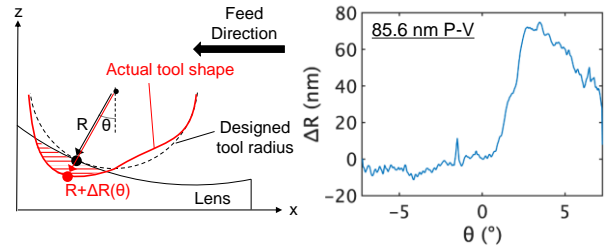


図5 工具形状誤差の模式図と算出結果

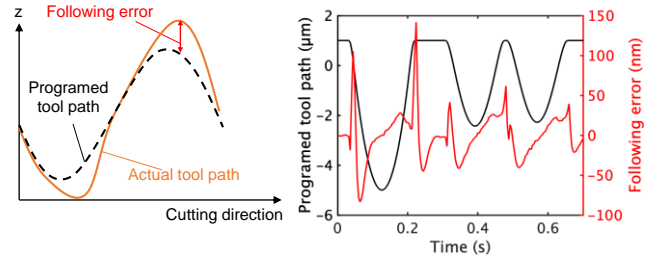


図6 追従誤差の模式図と算出結果

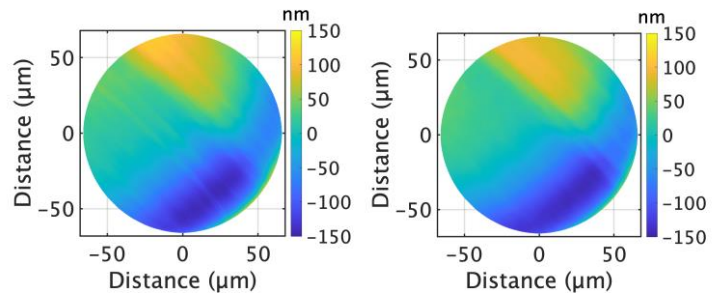


図7 ワーク外縁のレンズにおける形状誤差

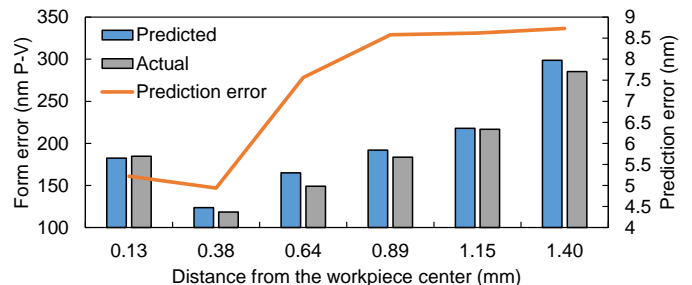


図8 複数のレンズにおける形状誤差の予測結果

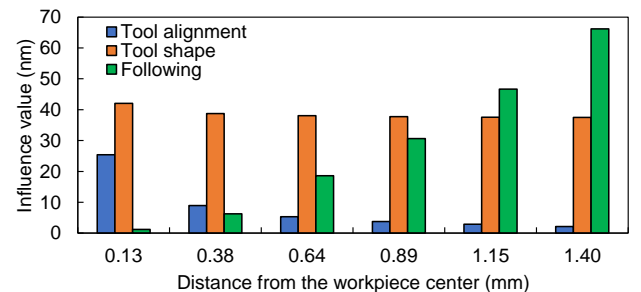


図9 形状誤差における誤差要因の影響度の算出結果

参考文献

- 1) R.Stevens et al. , The Imaging Science Journal (2010) 202-212
- 2) C.Chen et al. , Optical Manufacturing and Testing X (2013) Vol. 88380Y
- 3) 鈴木浩文ら, 精密工学会誌 (1999) Vol. 65-3