

ファストツールサーボを用いた超精密切削によるランダム構造光学表面の作製

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○谷川 茂 ◎閻 紀旺

要 旨

ランダム構造を有する表面は様々な分野で応用されており、光学分野では光の拡散にて重要な役割を果たす。エッチングによる従来作製法ではランダム性の制御が困難であり、加工後表面の予測ができないという問題もある。そこで本研究では、FTSを用いた超精密切削加工によるランダム構造光学表面の作製法を提案し、加工実験を行った。本提案手法によって、ランダム性の制御が可能となり、加工後表面の予測も容易となった。

1. 緒論

ランダム構造を有する表面は光学分野において拡散板 (Microlens Array Diffuser) として用いられている。表面は規則正しく配列された微小レンズに一定のランダム性を付与した形状となっており、本研究ではこのような表面をランダム構造光学表面と呼ぶ。ランダム構造光学表面を有する拡散板は他の形状の拡散板と比較して、入射光の強度プロファイルを維持しつつ、焦点が均質に分散された質の高い光の拡散を実現するという利点がある⁽¹⁾。ランダム構造光学表面を有した拡散板は現在スマートフォンのライトやディスプレイ、3D センシング技術等に利用され、さらなる小型化と高性能化が求められている。ランダム構造光学表面の従来の作製方法としてエッチングが挙げられる⁽²⁾⁽³⁾。しかし、エッチングは化学的な溶解除去を利用したものであるため、マイクロレンズの大きさや深さに対するランダム性の制御が難しい。そのため、理想的なランダム表面を作製することが困難であり、加工後の表面形状を予測できないという問題もある。

そこで本研究では、ファストツールサーボ (FTS) を用いた超精密切削加工によるランダム構造光学表面の作製を提案する。具体的には、あらかじめランダム構造光学表面を設計し、それに基づいて加工プログラムを作成した後、高速な工具往復運動が可能な FTS を搭載した超精密加工機を用いて加工を行う。設計段階でランダム性を自由自在に制御することができるのみならず、加工機の数値制御により設計されたランダム構造光学表面をナノスケールの高い形状精度で加工することが可能になる。

2. ランダム構造光学表面の設計

まず、MATLAB を用いてランダム構造光学表面を設計するプログラムを作成した。図 1 に、ランダム構造光学表面設計のプロセスを示す。各ディンプルは放物面とし、次式を用いて作成した。

$$z = a(x-b)^2 + c(y-d)^2 + e \quad (1)$$

x, y, z は各軸の変位を表す。 a, b はそれぞれ x 軸方向の大きさおよび位置を表す係数、 c, d はそれぞれ y 軸における大きさおよび位置を表す係数、 e は z 軸における深さを表す係数である。これらの各係数に、一定範囲内の乱数を乗算することでそれぞれのディンプルにランダム性を付与した。ランダム性が付与された各ディンプルをランダム性が付与する前の所定の位置に配置し、 z 軸方向に重なった値のうち常に最小のものを選択し結合していくことで、ランダム構造光学表面を作成した。開発したプログラムを用いて、一部の係数のみに乱数を付与させたり、乱数の値範囲などを変化させたりすることで多様なランダム構造光学表面の設計が可能となっている。

図 2 に設計したランダム構造光学表面の一例を示す。ベースとなる一つのディンプルサイズは直径 $100 \mu\text{m}$ 、深さ $5 \mu\text{m}$ である。これら各ディンプルにおいて、ディンプルの直径を決める係数 a, c の箇所に対し乱数範囲 $0.45 \sim 1.00$ の乱数を、深さを決める係数 e の箇所に対し乱数範囲 $0.60 \sim 1.00$ の乱数を付与することでランダム性を有したディンプルを作成した。各乱数範囲に対するディンプルの直径と深さの範囲はそれぞれ $100 \sim 150 \mu\text{m}$ と $3 \sim 5 \mu\text{m}$ となる。これらの各ディンプルを縦横 24 個ずつの計 576 個のディンプル群として配置し、前述したプロセスを用いて連続した接続を行い、切削加工実験を行うランダム構造光学表面の設計表面を作成した。

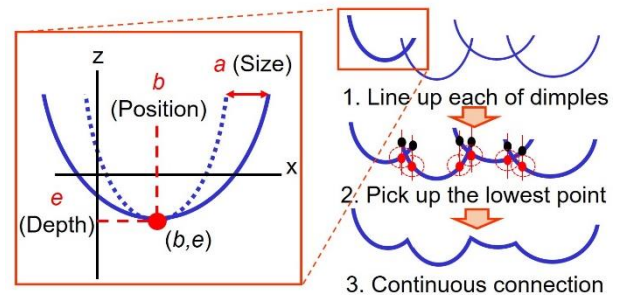
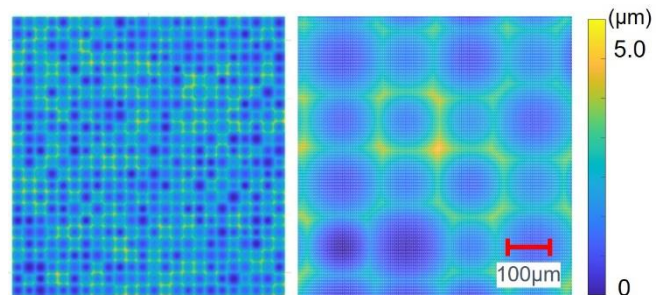


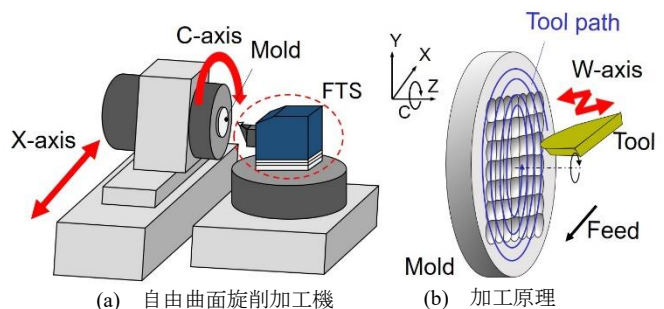
図 1 ランダム構造光学表面設計のプロセス



(a) 全体図

(b) 一部拡大図

図 2 設計したランダム構造光学表面一例



(a) 自由曲面旋削加工機

(b) 加工原理

図 3 FTS 旋削加工の模式図

3. 加工実験

切削加工実験を行うため、設計表面の形状に沿って工具刃先を動かすツールパスプログラムの作成を行った。ツールパスプログラムは加工の際に設計表面が再現されるように工具先端形状を考慮し作成を行った。切削加工実験は図 3 に示した超精密旋盤 Nanoform X (AMETEK Precitech 社製) にて X, C 軸を駆動させ、その動きにファストツールサーボユニット FTS5000 (AMETEK Precitech 社製) の W 軸を同期させ、二つを同時駆動する形式で行った。工具にはノーズ半径 0.09 mm 、すくい角 0° の単結晶ダイヤモンド R バイトを、被削材には直径 20 mm の無酸素銅を用いた。切削条件はスピンドル回転数 100 rpm 、送り量 $5 \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み量は $3 \mu\text{m}$ とした。加工後の表面観察および形状測定は、マイクロコップ (KEYENCE 社製) と白色干渉計 Talysurf CCI1000 (AMETEK 社製) を用いた。

4. 結果および考察

4.1 加工表面観察

図4に、加工したランダム構造光学表面の外観および表面拡大画像をそれぞれ示す。図4(a)が示す加工後表面の全体画像では、表面のランダム構造による光の散乱によって生じた明暗の異なるドット状のものが視覚的に確認することができる。図4(b)は図2(b)で示した設計表面一部の拡大図に対応した加工箇所拡大表面画像である。設計表面との比較を行うと加工後表面では各レンズの大きさ、深さ、エッジ位置のそれぞれが再現されていることが確認された。この結果より、本提案手法を用いることで従来法では困難であった加工後表面形状の予測及びランダム性の制御が可能になったことが検証された。

4.2 エッジ歪みの発生メカニズム

図5に加工領域中心付近と外縁の白色干渉計観察画像を示す。これらの画像におけるエッジの比較を行うと、中心付近ではエッジが再現されているのに対し、外縁部分のエッジに歪みが生じているのが見て取れる。加工表面外縁部のエッジが歪んだ原因として、ツールパスプログラム上で発生した補間誤差による影響が考えられる。

図6にツールパスプログラムによる補間誤差の発生メカニズムの概念図を示す。設計表面に沿って切削工具を動かすツールパスプログラムは個々の切削点によって定義され、各切削点は等角法によって配置される。そのため、中心付近では刃先が追従する切削点が密に配置されるのに対し、外縁部では中心と比べて切削点が疎になる。切削点間の加工は近傍の切削点をもとに補間処理を行うことで工具位置が決定されるが、切削点が疎であるほど補間の際に大きな誤差が生じることとなる。さらにこの補間誤差は細かく複雑な形状の箇所においてより大きくなる。加工領域外縁部のエッジはこれらの補間誤差拡大要因を満たしていることから、エッジの歪みの原因はツールパスプログラムにおける補間誤差であると考えられる。

そこで、切削加工実験で使用したツールパスプログラムから、補間誤差を考慮した加工後の表面をシミュレーションによって予測した。図7は予測した加工面中心部と外縁部のエッジの断面プロファイルとその実測値を比較したものである。なお、図中のエッジの断面図は図5の赤破線が引かれた部分の断面図に該当する。中心付近のエッジでは設計、予測、測定との3つの形状は一致しており、設計通りの形状が再現されていたことが確認できる。しかし、外縁部のエッジの断面図では設計形状と予測形状が異なる形状を示しており、大きな補間誤差が発生していることが確認できる。実際に計測された形状は予測形状に沿った形状となっており、これは補間誤差による形状誤差が原因と言える。外縁のエッジ断面図内の形状誤差の最大値を算出し、そこでの補間誤差の値を求めるとそれぞれ363 nmと257 nmになった。この箇所での形状誤差に対する補間誤差の影響の割合は71%となり、外縁のエッジの形状誤差に補間誤差が大きく関与していることが確認できる。これらのシミュレーション結果より、外側のエッジが歪んでしまった大きな原因は、等角法を用いたツールパスプログラムによる補間誤差であることが確認された。エッジの歪みは光の拡散における光の強度に影響を及ぼすため、今後の研究では、ツールパスプログラムの改善を行っていくことで、外縁部分のエッジの歪みを抑制することを目指す。

5. 結論

FTSによる超精密切削加工によってランダム構造光学表面の作製を試みた結果、以下の結論を得た。

- (1) ランダム構造光学表面設計プログラムの構築を行い、切削加工にて設計表面の再現に成功した。
- (2) 切削加工を用いることで、エッチング技術を用いた従来法では困難であったランダム性の制御を可能にした。
- (3) ランダム構造光学表面を切削加工した時、補間誤差による形状誤差が原因で、加工領域外縁のエッジで歪みが生じた。

本研究により、制御可能なランダム構造光学表面をナノスケールの高い形状精度で加工する可能性を示した。

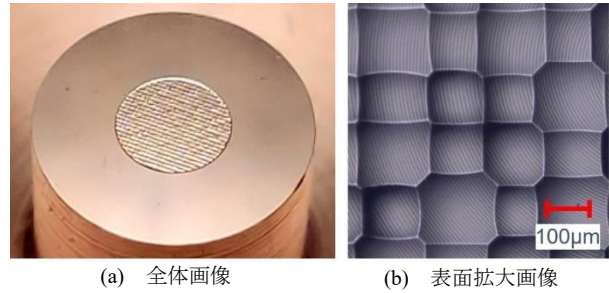


図4 加工したランダム構造光学表面

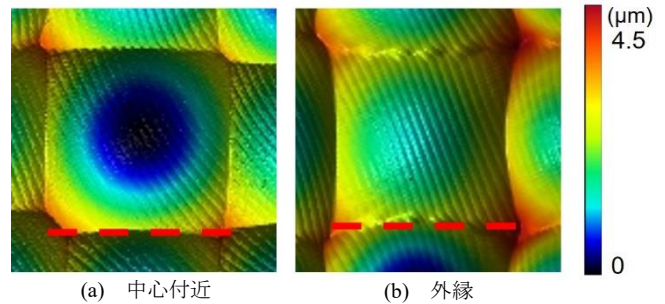


図5 加工領域内におけるエッジ観察

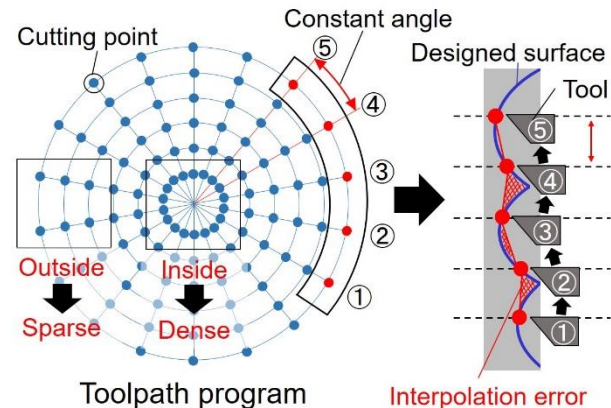
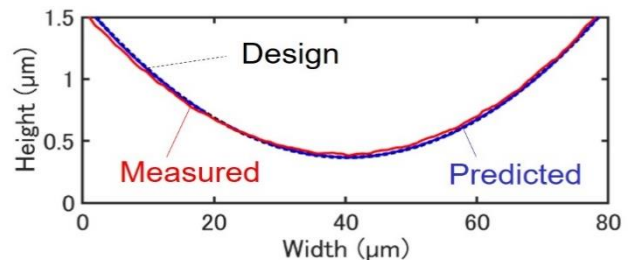
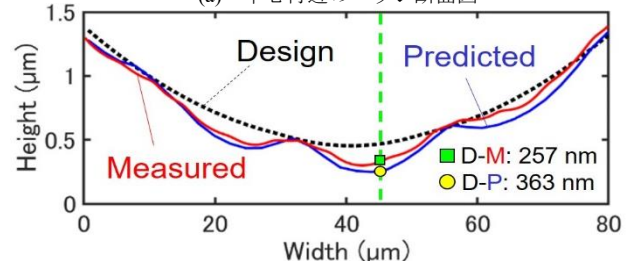


図6 ツールパスプログラムによる補間誤差



(a) 中心付近のエッジ断面図



(b) 外縁のエッジ断面図

図7 中心付近と外縁におけるエッジ断面図の比較

参考文献

- (1) S. Tasso, Structured microlens arrays for beam shaping, *Optical Engineering*, 42, (2003), 3084-3085.
- (2) C. Feng et al., Rapid fabrication of a large-area close-packed quasi-periodic microlens array on BK7 glass, *Optics Letters*, 39, (2014), 606-609.
- (3) R. Patrick et al., Two step process for the fabrication limited concave microlens arrays, *Optics Express*, 16, (2008), 19541-19549.