

令和元年6月27日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06022

研究課題名(和文)高精度中間周波数形状表現手法を用いた超精密形状創成加工シミュレータの開発

研究課題名(英文) Computer simulation method using highprecision form representation method including mid-spatial frequency

研究代表者

森田 晋也 (MORITA, Shinya)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：30360655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：以下の3点の研究項目の実施により、光学素子金型加工プロセスにおいて光学性能を再現し、輪帯ボケの少ないレンズ形状を得る研磨パスを工程設計することが可能となった。1.切削・研削加工によって創成された中間周波数形状のモデル化のための最適な曲面を生成する条件が明らかとなった。2.微小研磨工具を用いた超音波援用研磨加工により、金型表面形状の中間周波数形状の除去に必要な微小領域の除去特性を明らかとした。3.長田パッチを用いた光線追跡法および光束追跡法の検討を行い、輪帯ボケの強度むらを少ない光線数で定量的に評価することを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カメラ用の非球面レンズや自動車ヘッドライト用の自由曲面光学素子の加工技術において、中間周波数形状と呼ばれる波長数 $10\mu\text{m}$ ～数百 μm の表面微小うねりによる光学機能の悪化が問題となる。この領域は砥粒のランダムネスによる平均化効果が十分に働かない領域であるために研磨工程で十分に除去することが難しい。また十分に除去しようと長時間の研磨を行うと、加工時間コストの増大と大域的な形状精度の悪化が問題となる。そこでによる中間周波数形状の高精度かつ高速演算が可能な光線追跡手法を開発し、最小限の加工時間で十分な光学性能を持つコンピュータシミュレーション技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：It became possible to simulate the optical performance in the molding process of aspheric optics for digital single lens cameras, and to design the polishing path to obtain a lens shape with less ring band blurring. (1) The optimal conditions to model curved surfaces with sub-micron fluctuation in mid-spatial frequency wavelength created by ultraprecision machining process were clarified by this study. (2) The removal characteristics of the optical mold surface shape with sub-micron fluctuation in mid-spatial frequency wavelength by ultrasonic-assisted small tool polishing were clarified. (3) We examined ray tracing method using Nagata patch to simulate ring band blurring, and it was possible to quantitatively evaluate the ununiformed intensity of light in low calculation cost.

研究分野：超精密加工

キーワード：中間周波数形状 輪帯ボケ 長田パッチ 光学素子 微小工具研磨 金型

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年急速な小形・軽量化が進む情報機器において非球面レンズなどの精密光学素子は一層の微細かつ高精度な加工が要求されている。なかでも自由曲面光学素子は、車載用ヘッドアップディスプレイやヘッドマウントディスプレイ、全方位監視カメラなどさまざまな用途において需要が急速に拡大している。自由曲面光学素子の形状創成に欠かせないガラス成形ならびに樹脂成形用金型の形状創成には超精密切削加工や超精密研削加工が用いられ、表面粗さの修正に超平滑研磨加工が用いられる。しかしながら近年中間周波数形状と呼ばれる波長数 $10\mu\text{m}$ ~ 数百 μm の表面微小うねりによる光学機能の悪化が問題視され、光学に関する国際学会の Optical Fabrication 分野において独立したセッションが開かれるなど注目を集めている。

2. 研究の目的

カメラ用の非球面レンズや自動車ヘッドライト用の自由曲面光学素子の加工技術において、砥粒のランダムネスによる平均化効果が十分に働かない領域であるために研磨工程で十分に除去することが難しい中間周波数形状と呼ばれる波長数 $10\mu\text{m}$ ~ 数百 μm の表面微小うねりによる光学機能の悪化について、パラメトリック二次補間曲面表現式による中間周波数形状の高精度かつ高速演算が可能な光線追跡手法を適用する方法を提案する。本手法を切削・研削加工によって創成された中間周波数形状をモデル化し、研磨加工による中間周波数形状の遷移を基礎研磨実験による形状変化データベースにより予測し、加工プロセス中途における光学性能への影響を定量的に再現することで、形状創成 / 研磨の最適な工程設計を可能とする計算手法を提案することも目的とする。

3. 研究の方法

中間周波数形状は、加工の観点では切削・研削といった形状創成プロセスにおける工具軌跡によって発生し、研磨の平滑化プロセスにおける支配則である砥粒のランダムネスによる平均化効果が十分に働かない領域であるために研磨工程で十分に除去することが難しいことが知られている。品質管理の観点からは、光学素子における中間周波数形状のモデリングが従来手法で困難であり、そのためシミュレーションによる定量的な光学性能の評価手法が定まっておらず、周波数フィルタリングを用いた表面うねり振幅値による管理しか行われていなかった。

申請者は 2010 年に長田パッチという法線を利用したパラメトリック二次補間曲面表現式による中間周波数形状の高精度かつ高速演算が可能な光線追跡手法を提案し、計測点群の長田パッチモデル生成手法や内部屈折率分布を考慮した光線追跡手法などを実現した。そこで本研究では、

- (1) 本手法を切削・研削加工によって創成された中間周波数形状をモデル化し、
- (2) 研磨加工による中間周波数形状の遷移を基礎研磨実験による形状変化データベースにより予測し、加工プロセス中途における
- (3) 光学性能への影響を定量的に再現することで、形状創成 / 研磨の最適な工程設計を可能とする計算手法を行った。

4. 研究成果

以下の研究項目の実施により、光学素子金型加工プロセスにおいて光学性能を再現し、輪帯ボケの少ないレンズ形状を得る研磨パスを工程設計することが可能となった。

(1) 切削・研削加工によって創成された中間周波数形状のモデル化

表面計測で得られる物体形状点群データから異方性圧縮 SLIM 法により陰関数曲面を生成し曲面データを出力するアルゴリズムを作成し、検証を行った。異方性圧縮 SLIM 法の点群比率や近似値が変更されると曲面の破れや精度の低下などの問題が判明した(図 1)。その結果、

最適な SLIM 面を生成する条件に関する指針が得られ、切削・研削加工によって創成された中間周波数形状のモデル化のための最適な曲面を生成する条件が明

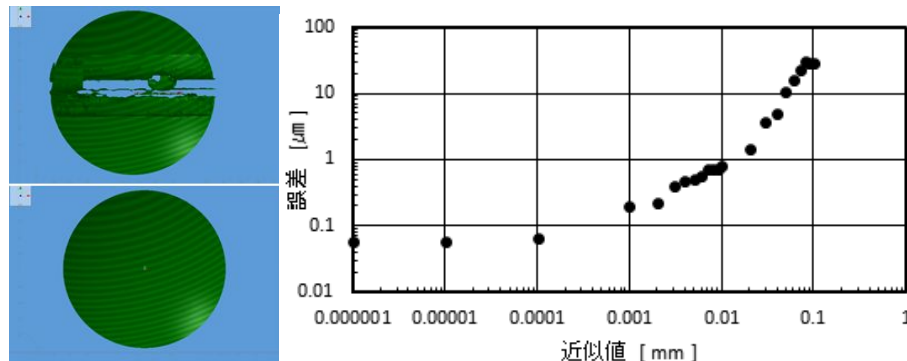


図 1. 異方性 SLIM 曲線を使ったメッシュ化による曲面作成(左上: 面が破綻あり, 左下: 良好に生成された, 右: 作成条件と形状誤差)

らかとなった。

(2) 中間周波数形状の遷移予測のための基礎研磨実験

超音波援用研磨装置を用い、金型表面形状の微小領域修正を試みた。ウレタン工具を用い、幅3mm以下の微小領域の除去を確認した。送り速度や圧力を変えることで研磨レートが変化することが見いだせた。また0.5mm微小研磨工具の新規な設計を行い(図2)樹脂3Dプリンタを用いて加工を行い、研磨特性を測定した。以上の微小研磨工具を用いた超音波援用研磨加工実験により、金型表面形状の中間周波数形状の除去に必要な微小領域の除去特性を明らかとした。

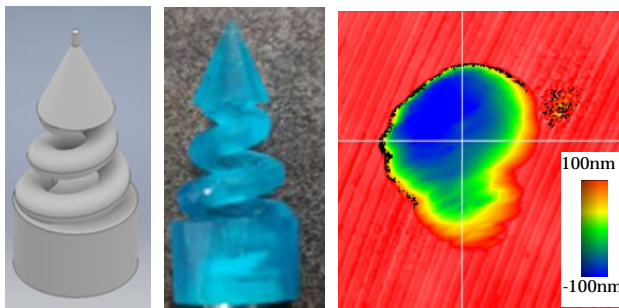


図2 微小研磨工具(0.5mm)の設計(左) AM加工(中)とその研磨特性(右)

(3) 長田パッチを用いた光束追跡法の検討と光線追跡法の高度化

長田パッチを用いた光線追跡法については、光線追跡法の高度化ならびに光束追跡法の適用への模索を行った。

光束追跡法に関しては、光線追跡によって得られた光線の配置をドロネー三角形分割法により接続情報を得て評価面における光線の粗密を評価することに成功した。

光線追跡法に関しては、レンズの形状誤差が輪帯ボケに与える影響やレンズのどの面がどの程度輪帯ボケに関与しているのか検討した。Zernike関数による光線追跡法を用いた基礎的なシミュレーションによると、輪帯ボケを表現するためには1条件あたり10万本程度の光線の評価が必要となることがわかった。そのため輪帯ボケが中心軸に対して回転対称である場合においては、評価ピクセル面の信号を中心周りの角度方向に積算し中心からの距離が同一のピクセルのデータを積算し平均化することで、輪帯ボケの強度むらを少ない光線数で定量的に評価することを可能とした。また、光学的な誤差を表すのに用いられるZernike関数と比較して多くの輪帯を表現できる長田パッチ(図4)を用いて中間周波数帯の輪帯ボケを再現することに成功した(図5)。長田パッチを用いた光線追跡法および光束追跡法の検討を行い、輪帯ボケの強度むらを少ない光線数で定量的に評価することを可能とした。

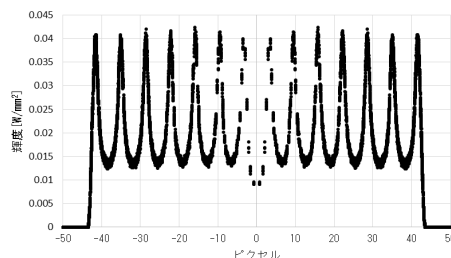


図3. 輪帯ボケ画像の積算による効率的評価法

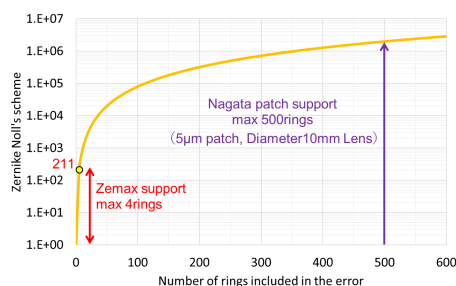


図4. Zernike多項式と長田パッチにおいて評価できる輪帯数の違い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

森田晋也, 加工機上計測および光学機能シミュレーションによる超精密光学素子の高精度化技術, 精密工学会誌 85巻 7号, 査読なし(解説記事), 2019年7月(掲載決定) 4ページ

〔学会発表〕(計 4件)

金子真也, 森田晋也, 山形豊, 非球面レンズ輪帯ボケシミュレーションに適した加工誤差形状表現手法の検討, 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(掲載決定)

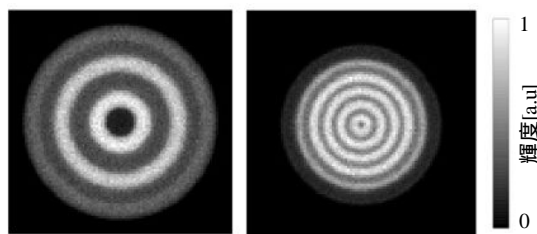


図5. 輪帯ボケシミュレーション結果. 左: Zernike 3輪帯, 右: 長田パッチ 6輪帯.

Shinya KANEKO, Shinya MORITA, Yutaka YAMAGATA, Onion-ring bokeh simulation by Nagata patch ray-tracing, Optical Fabrication and Testing (OF&T) in Optical Design and Fabrication Congress, pp. JT5A.10-1-JT5A.10-2 (poster), 11 June 2019, Washington, USA.

金子真也, 森田晋也, 山形 豊, 非球面レンズ輪帯ボケシミュレーションのための長田パッチを用いた曲面表現, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, J17, 684-685
金子真也, 森田晋也, 山形豊, 非球面レンズの形状誤差に起因する一眼カメラ輪帯ボケシミュレーション手法, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, B08-4, 250-251

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。