

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 森田 晋也

本論文は「離散的形状表現手法による高精度非球面光学素子機能シミュレーションに関する研究」と題し、プラスチック非球面レンズの製造工程において計測あるいは射出成形シミュレーションで予測された表面形状誤差と内部屈折率分布を利用して、レンズの光学性能の変化を定量的に予測するための光線伝搬計算手法とその応用技術に関する一連の研究で得られた成果を纏めたものである。

本文は以下に示す7章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と目的および本論文の構成について述べている。まず非球面光学素子の製造プロセスの現状とその問題点について纏め、次に形状誤差および屈折率分布を有する光線追跡シミュレーション手法の必要性を論じた。非球面レンズ成形品の性能予測評価手法として、従来の光学素子設計モデルとは異なる離散的な光学素子モデルを用いて、試作によって得られた形状ならびに成形加工シミュレーションによって予測された形状変化および内部屈折率分布に基づいて形状誤差を考慮した光学評価手法を行うことを提案した。離散的な光学素子モデルとは複雑形状を高精度に表現する離散的な表面形状モデルと任意の内部物性分布を表現する離散的な屈折率モデルからなり、成形プロセスにおける金型の形状誤差や成形に伴う形状誤差、内部の不均一に伴う光学性能の変化を予測・評価を行い、試作成形を行わなくとも製造プロセスの改善が可能となる目的とする性能が得られるようになり、これにより精密非球面光学素子の高精度化と工程短縮を実現しうることを示した。

第2章「形状誤差を有する非球面光学素子の高精度形状表現手法」では、非球面光学素子の光線追跡シミュレーションのための形状表現手法について、従来のレンズ形状表現手法である非球面多項式やスプラインやNURBSなどのCADによる曲面表現手法、ポリゴン、離散的2次曲面パッチなどの手法をあげ、それぞれの優劣を論じた。離散的2次曲面パッチの1種である長田パッチは、隣接パッチ間で数学的な C^0 接続が保証されており、パッチ頂点では接平面 G^1 接続が可能であるという特徴から、パッチ数の増加に伴い形状表現精度が急激に改善することが予測され、さらに線とパッチの交点算出に閉式解が存在するために形状精度と高速演算の両立が可能であるため、長田パッチの利用により形状誤差を有する非球面光学素子の高精度かつ高速な光線追跡シミュレーションを実現する可能性がある」と結論づけた。

第3章「表面形状点群からの法線付き三角形メッシュの高精度生成手法」では、形状誤差を有する非球面光学素子の光線追跡シミュレーション手法について述べた。まず長田パッチによる非球面レンズの形状の高精度表現手法を開発した。その結果、パーソナルコンピュータで取り扱い可能なパッチ数で非球面レンズの形状表現として実用上十分な精度を達成し、本手法によって複雑な形状誤差を有するレンズの形状を

ナノメートル以下の実用上十分な精度で表現できることが実証された。生成されたレンズモデルを用いて係数逆転法によって高精度に光線追跡計算を行う手法を新たに開発し、十分な精度で高精度交点計算ができることを実証した。長田パッチによる光線追跡計算について、長田パッチと光線の交差判定にダブル・バケティンク法を適用した高速化手法を開発し、交点算出時間を3,000倍に高速化し、パッチ数が増加しても演算速度がほぼ不変であることを実証した。

第4章「表面計測点群からの法線付き三角形メッシュの高精度生成手法」では、第3章で開発された成形レンズのための光線追跡手法のために、非球面光学素子形状計測点群から異方性圧縮SLIMを用いて長田パッチによるレンズ形状モデルを生成する手法や、スケーリング逆行列を用いた法線付きメッシュの座標変換、異方性ボクセルによるメッシュ生成、陰関数場を用いた法線付きメッシュのトリミングを新たに提案した。非球面レンズの実測データを行って圧縮倍率による精度への影響を確認し、 $0.2\mu\text{m}$ 以下の高い精度で光線追跡計算が可能な長田パッチ曲面を生成できることを実証した。

第5章「内部屈折率分布を考慮した光線追跡シミュレーション手法」では、内部屈折率分布のある光学素子の光線追跡シミュレーション手法について論じた。まず光線方程式に基づく屈折率分布を考慮したシミュレーション手法の原理を示した。次に本研究におけるシミュレーション手法として、射出成形シミュレーションによる屈折率分布の取得と直交格子を用いた内部屈折率データ構造および表面データの取り扱いと高精度補間計算の高速化について論じた。非球面レンズモデルを構築し、光線追跡計算の補間精度と計算時間について評価を行った結果、内部屈折率を考慮して高い補間精度で高速に計算できることを実証し、これによって本手法の有用性を示した。

第6章「検証用非球面光学素子の製作およびシミュレーションと光学評価実験との比較」では、実際に単結晶ダイヤモンド工具を用いて超精密加工された金型を用い、熱可塑性樹脂の射出成形加工によってレンズを製作した。市販の射出成形シミュレーションソフトウェアを用いて変形および内部屈折率を予測し、本研究で開発された光線追跡シミュレーションによって予測されたレンズの光学機能を、作成されたレンズの計測結果と比較し本手法の有用性を検証した。回折限界に近い集光の測定が可能な顕微鏡を用いた測定系によってレンズの焦点における微小な光量分布を測定した結果、実際のスポット半径は予測値に近い値を示した。レンズの内部屈折率の不均一を導入することによって、光線追跡結果のスポットダイヤグラムの光線分布に非対称な結像の状態が観察され、非球面レンズ内の内部屈折率分布の効果による焦点における非対称な結像を本研究の提案する手法によって初めて再現し可視化した。以上によって本手法の有用性を示した。

第7章「結論」では、論文を総括するとともに、今後解決されることが望まれる具体的な技術課題について述べている。

このように、本論文で提案された形状誤差・屈折率分布を有する光線追跡シミュレーションは、加工誤差を含む形状やレンズ内部の屈折率分布を高精度で表現することで、実形状あるいはシミュレーションによる解析結果を入力とする光学シミュレーシ

ョンを利用した光学機能を定量的な評価と、製造プロセスの改善が可能となる。プラスチックやガラスの成形シミュレーションと本論文で提案した光学解析ソフトウェアを組み合わせることにより、金型の形状誤差や成形に伴う形状誤差、内部の不均一を予測し、これに基づいてあらかじめ金型形状を補正し、試作成形を行わなくとも目的とする性能が得られるようになる。さらに、残存した形状誤差に関しても、実形状に基づくシミュレーションにより最終的な製品での光学性能評価を可能とする。これにより、精密非球面光学素子の高精度化と工程短縮を同時に実現することが可能となるため、工業的利用への期待も大きいと言える。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。