

中間周波数形状誤差に起因する 非球面レンズの輪帯ボケ現象の 光線追跡シミュレーション

東京電機大学 工学部先端機械工学科
森田晋也

1. 序論

非球面レンズは球面収差や歪曲収差などの補正に優れるレンズで、金型による大量生産によって製造され様々な光学機器で用いられている。しかし、金型に含まれる加工誤差は、光学機器の性能低下の原因となる。その例として一眼カメラの「輪帯ボケ現象」が挙げられる。図1のようなボケ像の縞模様の中で、非球面レンズを含むレンズで発生しやすい現象として知られている。この現象を利用し、コンピュータで描写する映像や画像をよりリアルなものにする技術も提案されている¹⁾。輪帯ボケ現象の詳細なメカニズムは解明されていないが、加工で発生する表面のうねりのうち、除去のしづらい中間周波数形状誤差 (MSF) が原因と考えられている。波長は0.1~1mm程度で、粗さと形状誤差の間に位置し、屈折として作用することから影響が大きいとされている。

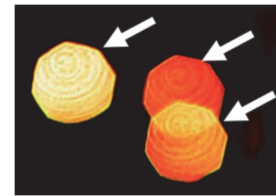


図1 一眼カメラの輪帯ボケ

本研究では、一眼カメラの輪帯ボケ現象を利用し、光学素子の加工精度とその与える影響の検証方法を確立することを目指す。輪帯ボケのシミュレーションによってその発生原因を検討し、メカニズムの解明を目指す。これにより、加工精度から製品性能が評価できるようになり、光学機器の設計や製造過程で活用することが期待できる。そこで本研究では、輪帯ボケのシミュレーションで必要となるボケ像の比較方法や、シミュレーションに適した加工誤差の形状表現方法を検討した。

2. 長田パッチを用いた輪帯ボケシミュレーション

2-1 輪帯ボケシミュレーションの課題

本研究では、市販の光学・照明系設計ソフトウェア (Zemax OpticStudio 16.5 SP1) とズームレンズ 29-78mm f/2.9-5.7²⁾を使用した。上記レンズのいずれか1面を製造時に発生する加工誤差に見立てた形状とし、光線追跡により輪帯ボケのシミュレーションを行った。形状表現方法の一つとして Zernike 多項式があり、加工誤差による輪帯ボケのシミュレーションに成功している。Zernike 多項式は円形領域において凹凸を表現する関数で、高い次数では複雑な形状を表現することができる。しかし計算コストや計算精度の問題から、Noll の記法³⁾において 211 次までしかソフトウェアで計算ができず、MSF の表現が難しい。この上限では図2のように3本程度の輪帯ボケしかシミュレーションができず、実際の輪帯ボケに近い本数には届かないことが確認できた⁶⁾。

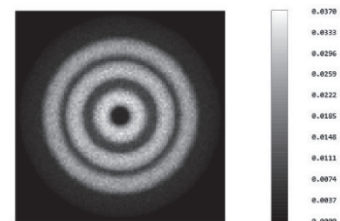


図2 輪帯が3本の輪帯ボケ

2-2 長田パッチの概要^{4,5)}

より複雑な形状を表現でき、光学素子の表現に適すると考えられている長田パッチという形状表現方法がある。多角形の頂点の位置ベクトルと法線ベクトルによりメッシュを構成し、曲面を表現する方法で、計算コストが低く、メッシュを細かくすることにより誤差の少ない高精度な計算が可能である。パッチで構成されていることから、局所的な形状の表現が可能で、局所的な形状の存在が他の部