

長田パッチを用いた複雑形状レンズの表現方法と光線追跡

東京電機大学 ○太田雄生 金子真也 ◎森田晋也

要旨

近年球面収差をもたない回転軸対称レンズの解析的設計手法が提案されているが、レンズ形状を単純な関数として表現できないため形状表現と解析が困難であった。そこで、複雑な曲面形状を効率的に表現し高速に光線追跡計算が可能である二次曲面パッチ（長田パッチ）を用いることで、市販の光学設計ソフトウェア上で本レンズの形状表現と解析を行い、回折限界以下の集光が得られていることが確認された。

1. 背景

カメラなどの光学機器は何枚ものレンズを用いて光学系を構成している。近年の加工技術や生産技術の向上により、多くの光学機器には光の収差を球面レンズよりも小さくすることのできる非球面レンズが使われている。そのため、多くの光学機器が軽量化、高性能化している。

近年、球面収差のない一枚レンズを設計するため、一般式が考え出された^[1]。この式はスネルの法則とフェルマーの原理によって、与えられた任意の入射面に対して出射面の計算を行うものであり、入射面がどのような形状であっても、レンズの半径や屈折率などいろいろな条件によって形状を設計できる。

しかし、この一般式で設計したレンズの出射面は、パラメトリック表現であるので、レンズとして成立しない形状になることがある。また形状が陽に表現されておらず、一般の光学設計ソフトで表現、解析することができない。

2. 長田パッチを用いたレンズ表現

そこで、先行研究^[2]でレンズ形状を表現するのに用いられていた、長田パッチ^[3]にて形状表現を行う。長田パッチは、形状を離散的に表現できるため、表現できる形状の自由度が高いといった利点があり、解析的に表現できない形状を表現するのに適している。長田パッチとは、図 2 のように三角形の頂点座標と、各頂点に与えられた単位法線ベクトルから三角形領域内に丸みを持って補間する曲面式で定義されている^[4]。

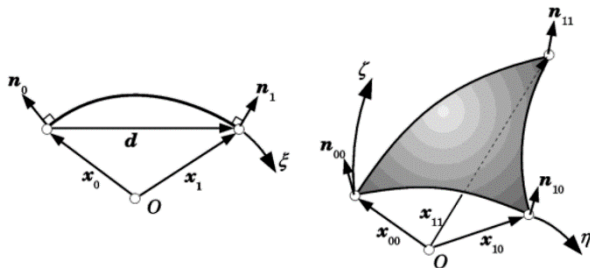
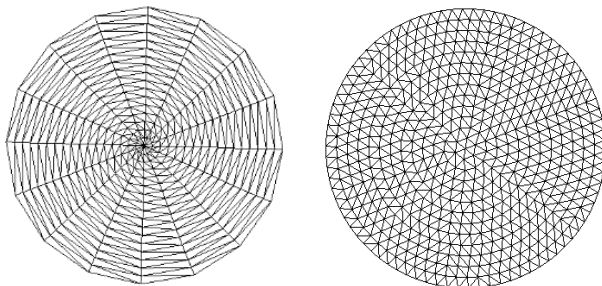


図 2 長田パッチによる補間^[4]

長田パッチを用いたレンズ形状の表現手法として等角分割法と等面積分割法が提案されており、パッチの分割方法は図 3 のようになる^[5]。



(a) 等角分割法 (b) 等面積分割法
図 3 等角分割法と等面積分割法の点列配置

しかし、長田パッチの欠点として、理想とした円形状にはならず、形状誤差が生まれてしまう。このような形状誤差はパッチの分割数を増やしていくことでわずかな誤差にできる。また、等角分割法

はパッチのアスペクト比が悪くなるため、精度悪化につながる。このように、長田パッチを用いて作成したレンズ形状は、理想としたレンズ形状を表現できず、微小な形状誤差が生まれてしまう。だが、実際に光学機器に用いられている光学素子は、現在の生産技術では微小な形状誤差を持って生産される。そのため、シミュレーションを行うには長田パッチを用いたレンズ形状の表現が適しているといえる。

3. 目的

これまでに解析的に表現できないレンズ形状でのシミュレーションは行われていない。したがって、球面収差のない非球面一枚レンズ設計の一般式を用いてレンズ形状を計算し、解析的に表現できないレンズ形状を、長田パッチを用いた表現方法で三次元的に表現する。それから表現したレンズ形状でシミュレーションを行い、レンズの光学性能評価を行うことを目指す。

また、シミュレーションを行うことで、光学機器などの最終製品に光学素子が組み込まれた際の性能予測が可能になり、性能に見合った品質で製品を生産できる。さらには、長田パッチを用いたレンズ形状でシミュレーションを行うことにより、レンズ製造誤差を表現できるため、光学機器の高性能化と製造工程短縮を同時に行い、可能にすることが目的である。

4. レンズ形状の表現プロセス

4.1 レンズ形状の計算

数式処理ソフト (Mathematica) を用いて球面収差のない非球面一枚レンズ設計の一般式を用いて入射面の形状を決定し、レンズ形状を計算した。図 4 に計算して作成したレンズ形状を示す。

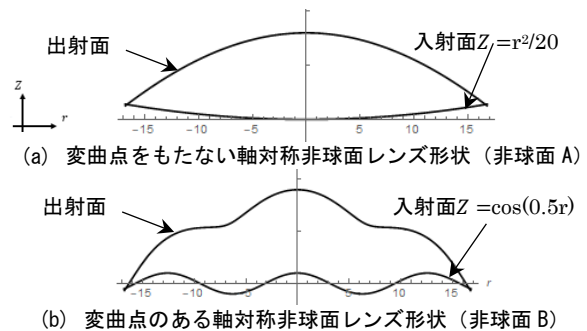


図 4 計算して作成したレンズ形状の断面図

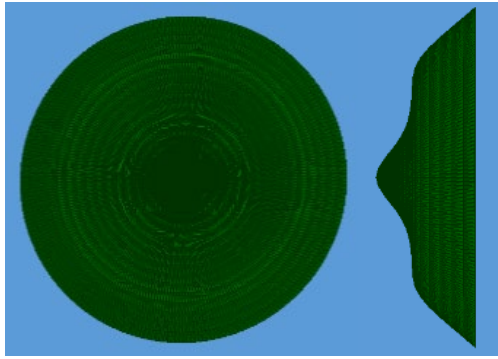
4.2 長田パッチを用いたレンズの形状表現

2種類の軸対称非球面レンズ形状(変曲点をもたないレンズ A: 図 4(a)と変曲点をもつレンズ B: 図 4(b)) についての長田パッチデータ作成を行った。計算したレンズ形状を長田パッチの等角分割法と等面積分割法を用いて点列座標をそれぞれ二次元的に出力し、表現した。次に、出力した点列データと Mathematica でドローネー三角形分割法と球面収差のない一枚レンズの一般式を用いた三次元の点列データと各点の単位法線ベクトルの計算を行い、長田パッチデータを作成した。作成した長田パッチデータを Wavefront OBJ ファイル形式に変換し、形状表示ソフト (V-SLIM) でレンズ形状を表現した。

図 5 に長田パッチを用いて表現した変曲点のあるレンズ形状を示す。

図 5 ように長田パッチを用いることで、解析的に表現できないレンズ形状も表現することができた。これにより、シミュレーションソフトで形状を表現することができない形状も長田パッチを

用いることで表現できることがわかった。



(a)上面図 (b)側面図
図5 長田パッチを用いて表現したレンズ形状

5. 球面収差のない一枚レンズの性能評価

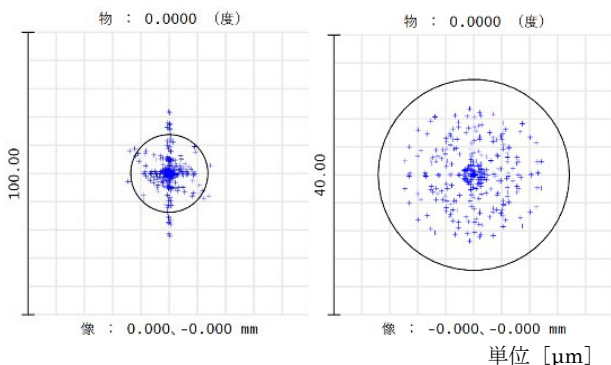
球面収差のない一枚レンズの性能評価を行うため、光線解析ソフト (Zemax OpticStudio) と作成した長田パッチデータを用いて、シミュレーションを行った。等角分割法と等面積分割法によるシミュレーション結果とパッチ数の異なる等面積分割法によるシミュレーション結果の比較をした。理論上の回折限界半径は 0 [μm] になるが、形状誤差を持った長田パッチデータで解析を行ったため、レンズが光学的性能を有しているかは結像が回折限界半径内かで評価する。

図6にそれぞれ分割数60としたレンズAの等角分割法と等面積分割法でのスポットダイアグラムによるシミュレーション結果を示す。

等角分割法と等面積分割法で作成した長田パッチデータはどちらがシミュレーションに適しているかを比較した。分割数でのシミュレーション結果の差をできる限りなくすため、近い分割数で作成した長田パッチデータを用いた。図7にレンズAの等角分割法と等面積分割法によるシミュレーション結果を示す。

また、分割数を変えることでシミュレーション結果にどのような影響を与えるかを調べるため、異なる分割数の等面積分割法で作成した長田パッチデータでのシミュレーション結果を比較した。図8にレンズAの分割数の異なる等面積分割法によるシミュレーション結果を示す。

表1にスポット半径によるシミュレーション結果を示す。



(a) 等角分割法によるデータ (b) 等角分割法によるデータ
図6 スポットダイアグラムによるシミュレーション結果

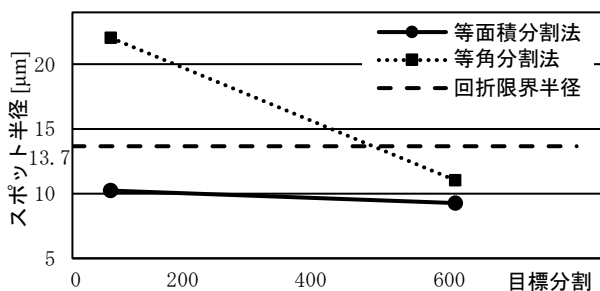


図7 等角分割法と等面積分割法による結果

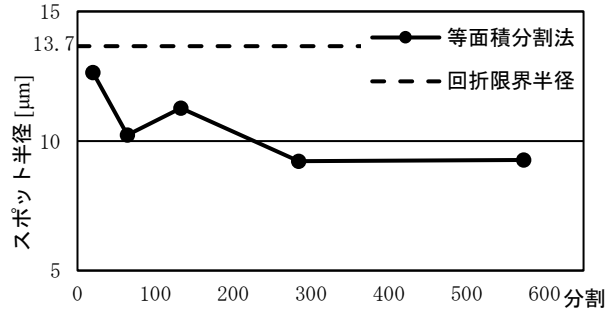


図8 分割数の異なる等面積分割法による結果

表1 スポット半径によるシミュレーション結果

分割数	等角分割法		等面積分割法				
	60	600	20	64	133	284	573
RMS半径 [μm]	6.95	5.42	6.69	5.34	5.64	5.02	4.15
GEO半径 [μm]	22.04	11.03	12.64	10.23	11.27	9.22	9.27

結果からレンズAのシミュレーションでは、光線が集束していることがわかった。等面積分割法で作成した長田パッチデータはどの分割数でも回折限界半径内に結像できた。また、等角分割法も分割数を増やすことで回折限界半径内に結像できた。これにより、等面積分割法で作成した長田パッチデータは等角分割法よりも少ないデータ量で理想的なシミュレーションを行えることがわかった。また、一般式で作成した長田パッチデータは回折限界半径内に結像し、球面収差のない一枚レンズとしての光学的性能を示すことができた。

しかし、レンズBのシミュレーションは、光線は集束しなかった。これは、長田パッチのメッシュ作成方法に誤りがあるか、長田パッチ光線追跡アルゴリズムに問題があるかのいずれかが考えられ、改善は今後の課題としたい。

6. 結言

解析のできないレンズ形状は、長田パッチを用いることでレンズ形状を表現し、解析ソフトでシミュレーションを行うことができた。

長田パッチの分割数を増やしていくことで、形状誤差を微小にでき、また等面積分割法の長田パッチデータがシミュレーションに適していることがわかった。

謝辞

ご協力いただきました(国研)理化学研究所 山形豊様、会津大学西館陽平様、(株)モノコミュニティ 内田幸雄様に謝意を表します。

参考文献

[1] Rafael G. González-Acuña, Héctor A. Chaparro-Romo, General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration, Appl. Opt. 57, 9341-9345 (2018).
 [2] 金子真也, 山田浩也, 東京電機大学卒業論文 (2018).
 [3] Takashi Nagata, Smooth local interpolation of surfaces using normal vectors, J. Appl. Math. 2010, 952420 (2010).
 [4] 西館陽平, 森田晋也, 山形豊, 任意の点群入力を使った成形レンズのための光線追跡法, 2010年度精密工学会秋季大会(2010).
 [5] 森田晋也, 東京大学博士論文 (2013).