

Particle Swarm Optimizationによる結像光学系の最適化

佐藤 健

品野 勇治

東京農工大学

結像光学系とは、カメラや顕微鏡のように像を生成することを目的とした光学系である。これらの光学系を自動的に設計する有効な手法は未だに開発されておらず、光学的な知識や光学系設計の経験を用いた試行錯誤の繰り返しから新しい光学系が設計されている。そこで本研究では、光学系の自動設計を最終的な目標と定め、本稿にはその一部として光学系設計に対する Particle Swarm Optimization の適応を行った。

Optimization of the optical image forming system by Particle Swarm Optimization

Ken Sato

Yuji Shinano

Tokyo University of Agriculture and Technology

The optical image forming system is included many optical systems, such as a camera and microscope. Design of the optical image forming system still much depends on experiences of designer, and few part of design process is automated. The aim of our research is to automate design process of the optical image forming system. In this abstract, we apply technique of particle swarm optimization to design of the optical image forming system.

1 はじめに

光学系とは、「一枚、または複数枚のレンズを組み合わせて一定の機能を持たせたもの」と定義される。本研究では、入射した光を精度良く集光する結像光学系の設計を対象とする。光学系の結像性能は、各面における曲率・面間距離・ガラスの材質(屈折率)等によって決まる。これらを調整し結像性能を向上させていくことが、光学系の最適化である。光学系の設計には、他の機器設計分野にはない設計を困難とする特徴的な面が多く存在する。特に、光学系は全体としてのみ機能し、それぞれの部分の機能を分離することはできない点が設計を困難にしている。光学系を設計する際に候補となる構成要素のもつパラメタの組合せは莫大な数となるが、部分の分離ができないという特徴から、

全体像を逆解析的に求めることは非常に困難である。

現在でも、光学系を自動設計できる有効な最適化手法は開発されておらず、実際の光学系設計においては、光学に通じたベテランの設計者の試行錯誤による概形決定と、計算機による微調整の繰り返しが行われている。現状では、概形の決定段階は、設計者の光学的知識と経験によるところが大きい[2][3]。

2 光学系の設計工程における最適化

LENS Design[1]によると、光学系の設計工程における最適化は一般的には3段階に大別されるとある。第1段階は光学系の概形決定段階で、過去に特許であった光学系や、設計者自身の光学的な知識・経験から光学系の大まかな

形を決定する。この段階では結像性能よりも、集光されるべき光線が光学系の途中で全反射・拡散することなく像面まで到達できるかが重視される。第2段階では、第1段階で生成された光学系に対して最適化が行なわれる。この第2段階での最適化では、光学系の仕様を満たしつつ、像のボケ・にじみ・ゆがみを除去する事に専念される。第3段階では、現実的な用途を考えた上で光学系の局所的な最適化が行なわれる。第3段階での最適化では、第2段階で向上された結像性能はできるだけ維持しながらも、その他の現実的な条件に沿うような光学系へと最適化される。具体的には、例えば結像性能が低下するとしても、ガラスの総質量を減少させることができれば、光学系の重量と製造コストの面では最適になる。このようなトレードオフは多様に存在し得るが、最終的には設計者が判断し最終的な光学系が設計される。

本研究では、光学系設計の全工程を含む自動設計を最終的な目標と定め、全工程を次のように分割する。まず、第1段階は光学系の概形を決定し、その概形の範囲内での複数の多様な光学系群の生成を行う初期解生成段階とし、第2段階は第1段階で生成された初期解群を用いた最適化段階とする。第2段階では複数の光学系から、仕様を満たしつつ像質を向上させた1つの光学系を生成する。第3段階は、本来の第3段階と同様である。

本稿では、この定義した設計工程中から、第2段階にあたる最適化を扱う。

3 光学系の評価

光学系の用途や求められる性能のレベルによって、光学系には様々な評価基準がある。その基本となる評価基準は、理想的な結像位置と実際の結像位置とのズレで、これは「収差」と呼ばれる。収差は球面収差・コマ収差・非点収

差・像面湾曲・歪曲の5種に分類される。

収差の発生量を視覚的に表現する場合、図1のようなスポットダイアグラムが用いられる。スポットダイアグラムは、光学系に任意の角度から光線群を入射させた場合に、各光線が像面のどの位置に到達したかをシミュレートしたものである。

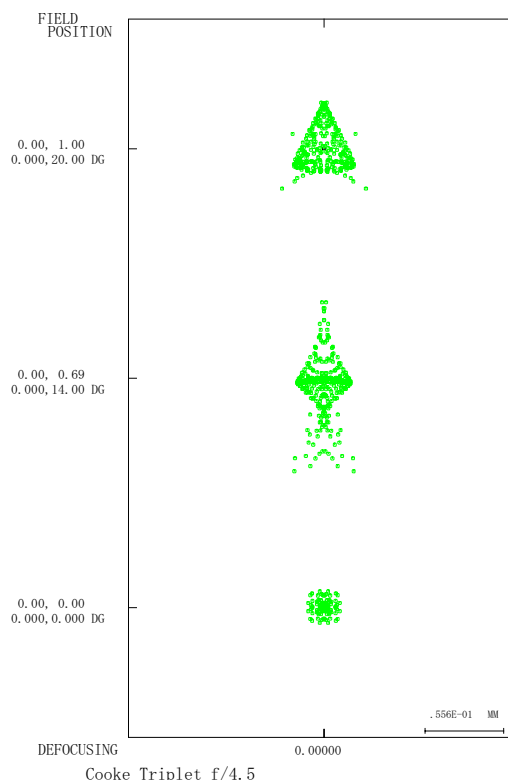


図1：スポットダイアグラム

4 問題設定

本研究では、問題を簡単にするため、いくらかの問題設定を行っている。まず、少ない枚数で収差を除去する非球面レンズは扱わない。非球面のレンズを扱う場合、パラメタの数が爆発的に増えてしまうことから、レンズ面は球面のみを扱うものとした。

次に、本研究における評価関数は像面上での各光線の結像点と理想点のズレの総和で表現した。これを最小化することで、5種の収差のうち4種の収差を抑えることが可能である。こ

の4種は、「像のボケ」に相当する収差であり、像の質を考えた場合にはもっとも根本的な要素である。残る1種は歪曲収差であるが、これは「像のゆがみ」に相当する収差である。本来はゆがみも抑えるべきだが、5種の収差を一度に抑えることは困難であるため、まずはボケのみを対象として研究を行うことにした。

研究のための光学系の目標仕様を右のように定めた。本研究では、汎用的

F 値	: 4.5
焦点距離	: 50mm
画角	: 46°

な光学系の最適化を目標としているため、仕様は一般的なカメラレンズの仕様とほぼ同様なものと定めた。なお、F 値は像の明るさを表す数値で、F 値が小さいほど像が明るいことを示す。画角とは、光学系に入射する光線群の角度の範囲を示す数値である。

5 最適化手法

光学系の設計では、古典的には、減衰最小自乗法 (DLS : Damped Least Square) が用いられてきた。しかし、近年、メタヒューリスティックスの適用例も増えている。例えば、文献[4]では、大域的最適化として実数値 GA (遺伝的アルゴリズム) を用いている。また文献[5]は、GP (Genetic Programming) による最適化を行い、板レンズ群から特許となっている光学系と同等性能の光学系の生成に成功したと報告している。

本研究では、最適化手法として Particle Swarm Optimization(PSO) [6]を採用した。PSO とは、鳥や魚の群れが行動する様子を模倣した進化的アルゴリズムの一種である。複数個の個体 (Particle) を用いて解集団を生成し、各個体は速度ベクトルを持つ。個体ごとの暫定解情報 (Local Best) と、解集団全体での暫定

解情報 (Global Best) を速度ベクトルに加味することで解の更新を行い、Best Solution を発見する手法である。PSO の解の更新式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}' &= w\mathbf{v} + c_1r_1(\mathbf{P}_L - \mathbf{x}) + c_2r_2(\mathbf{P}_G - \mathbf{x}) \\ \mathbf{x}' &= \mathbf{x} + \mathbf{v}' \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{x} は解ベクトルを示し、 \mathbf{v} は速度ベクトルを示す。 \mathbf{P}_L は個体ごとの暫定解情報を保持するベクトルであり、 \mathbf{P}_G は解集団全体での暫定解情報を保持するベクトルである。 r_1, r_2 は[0,1]の乱数、 w, c_1, c_2 は探索の速度を調整するためのパラメタである。

単純な GA のオペレータはランダム性が強く、光学系の設計問題においては実行不可能な解が生成されやすい。一方で PSO は、Global な探索空間における山登り法とみなせる。ただし、慣性を考慮するので厳密に同じではない。これは、適切なパラメタを与えることが出来れば、各初期解の周辺を探索しつつより優良な初期解の方向へ収束していくことが可能であると考えられる。そこで、本研究では PSO による最適化を試みた。

6 実験および考察

光学系設計の第1段階にあたる初期解群の生成に関しては、暫定的にランダムに解を生成した。PSO では最適化中でレンズ枚数が変化する事は無く、レンズ3枚のランダムに生成された初期解群で最適化を行う場合、最終的な解もレンズ3枚となる。数値実験はレンズ3枚、4枚、5枚のそれぞれの場合において実験した。初期解群の個数は100個体とした。

PSO を適応した結果は、紙面の都合上レンズ5枚の場合にのみ図2に示す。

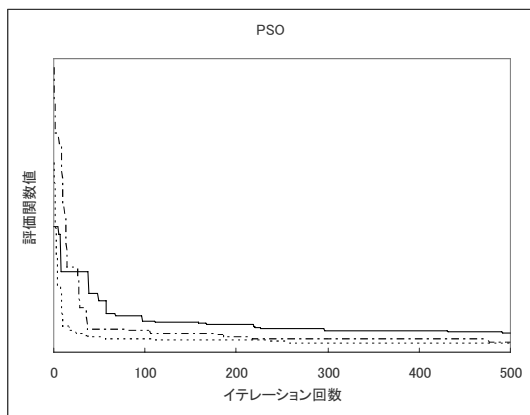


図2：PSO 実行の様子（レンズ5枚）

本実験では、終了条件を 500 イテレーションとして設定した。図2では、改善の多くは100 イテレーション以内に生じている。それ以後もわずかに改善は生じていることがわかる。

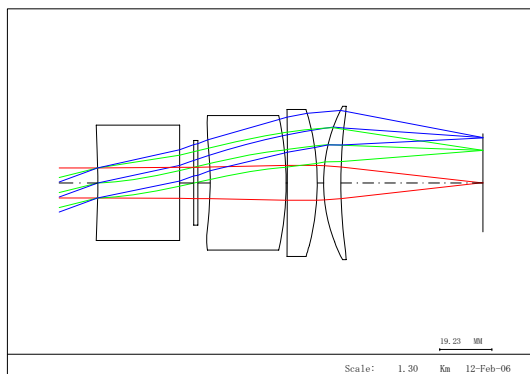


図3：PSO 実行結果（レンズ5枚）

図3の光学系は、本実験において最も評価関数値の良かった光学系を描画したものである。ランダムに生成された初期解から比べると大きく改善されている。様々な今後の課題はあるが、本実験では、第2ステップに対するアルゴリズムの効果として PSO が有望な光学系の最適化手法となる可能性を示した。

7 おわりに

本稿では、光学系の設計に対して最適化手法を適用するための設計工程を定義した。また、定義した設計工程における3段階の中で第2段階の最

適化に対して PSO による最適化を試みた。本稿で示した実験では、ランダムに生成した初期解を用いた。しかし、第1段階において、適度な多様性をもった解集団の生成が実現できれば、それらを本稿で示した PSO の初期解として与えることで、更なる効果をあげられるものと考えられる。

今後の課題は、多様性を持った初期解集団生成アルゴリズムの開発と、それらに対する PSO での最適化の効果検証である。また、PSO という手法は比較的新しい手法であり、現在も日々新しい試みがなされている。次々と発案される改良型 PSO の適用による効果検証も必要である。

参考文献

- [1] Gregory Hallock Smith : “LENS Design”, Willmann-Bell, Inc., Virginia, 1998
- [2] 高橋友刀 : “レンズ設計”, 東海大学出版社, 東京, 1994
- [3] 松井吉哉 : “レンズ設計法”, 共立出版株式会社, 東京, 1972
- [4] I. Ono, S. Kobayashi, K. Yoshida, ”Optimal lens design by real-coded genetic algorithms using UNDX”, Computer methods in applied mechanics and engineering, , 2000, pp.483-497,
- [5] Koza, John R., Al-Sakran, Sameer H., and Jones, Lee W., “Automated re-invention of six patented optical lens systems using genetic programming”, Genetic And Evolutionary Computation Conference (GECCO 2005), Washington DC, USA, June 25 - 29, 2005. Proceedings, pp.25-29.
- [6] Kennedy, J. and Eberhart, R., “Particle Swarm Optimization.” Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, pp. 1942-1948.