

同時摂動型最適化法による回折光学素子の最適化 - 二波長回折光学素子の最適化設計 -

Optimization of Diffractive Optical Element by using Simultaneous Perturbation Algorithm - Design of a Dual-Wavelength Diffractive Lens -

後藤哲生 松島恭治

Tetsuo GOTO and Kyoji MATSUSHIMA

関西大学工学部電気工学科

Department of Electrical Engineering, Kansai University

E-mail:goto@laser.ee.kansai-u.ac.jp

The application of novel non-linear optimization algorithm to design of a diffractive optical element is investigated. This optimization algorithm, called Simultaneous Perturbation Algorithm (SPA), is proposed as a learning rule of neural networks and features suitability for problems with much many parameters. Design of a dual-wavelength diffractive lens by using SPA is demonstrated.

1 はじめに

回折光学素子 (Diffractive Optical Element, 以下 DOE) は, 光の回折現象を利用し, 入射波面を別の波面に変換する光学素子である. 回折光学素子の最適化には, Direct Binary Search[1], Simulated Annealing, 反復フーリエ変換法 [2] などが知られている. Direct Binary Search や Simulated Annealing は, 評価関数が設定でき, 自由な設計目標に収束させることができるが, 一つのパラメータごとに評価・修正を行うため, 膨大な計算量を必要とする. 一方, 反復フーリエ変換法の処理は高速であるが, 評価関数が設定できないため, 柔軟性に欠けることが問題である. そこで本研究では, ニューラルネットワークの学習則として開発された同時摂動型最適化法 (Simultaneous Perturbation Algorithm, 以下 SPA)[3] による DOE の設計を試みている [4]. SPA は, 一つのパラメータを修正する毎に評価関数の評価を行うのではなく, 全てのパラメータを同時かつランダムに評価・修正し, 確率的に最適化を行う手法であるため, DOE の様に多数のパラメータを有する最適化問題に有効であると考えた. 本稿では, SPA を用いた二波長回折レンズの最適化設計を試みた結果を報告する.

2 同時摂動型最適化法を用いた二波長回折光学素子の最適化

波長 λ において屈折率 $n(\lambda)$ の素材で製作される透過型 DOE では, DOE の径方向の厚さ分布 $h_{ref}\hat{h}(r)$ と位

相分布 $\tau_\lambda(r)$ の関係は, Thin Element Approximation の基で,

$$\tau_\lambda(r) = \frac{2\pi}{\lambda}[n(\lambda) - 1]h_{ref}\hat{h}(r) \quad (1)$$

で表される. ここで, $h_{ref} = \lambda_{ref}/[n(\lambda_{ref}) - 1]$ は真空中で波長 λ_{ref} の光が, 屈折率 $n(\lambda_{ref})$ の媒質を通過する際に 2π の位相差を生じる距離であり, $\hat{h}(r)$ は h_{ref} を単位とする相対的な厚さ分布である. 二波長回折レンズを設計するため, この $\hat{h}(r)$ を離散化したパラメータベクトル $\mathbf{T}=(h_1, h_2, \dots, h_k, \dots)$ を SPA により最適化する. SPA による $\hat{h}(r)$ の最適化の流れを Fig 1 に示す.

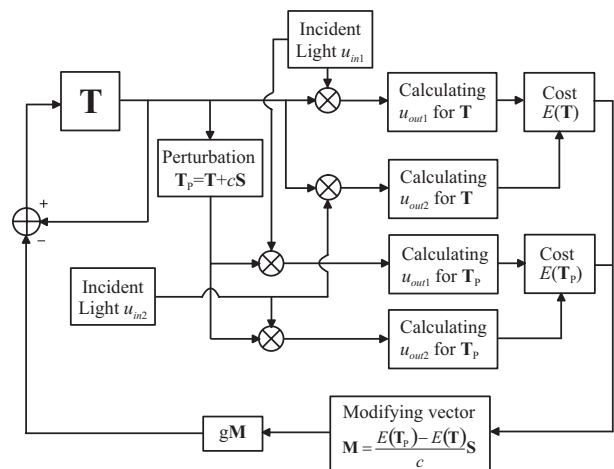


Fig 1: A procedure for optimizing a dual-wavelength lens by SPA

まず始めに、厚さ分布 T から求まる位相分布と入射光波 $u_{in}(r)$ を乗じて、DOE 通過後の複素振幅 $\tau_\lambda(r)u_{in}(r)$ を求め、回折計算により出力光波分布 $u_{out}(r)$ を計算し、それを評価して T の評価値 $E(T)$ を求める。次に、ランダムな摂動 cS を T に加えた厚さ分布 T_P を求める。ここで S は + 1 または - 1 のランダム値から成る符号ベクトルである。 T_P に対しても同様に出力光波分布を求め、 T_P に対する評価値 $E(T_P)$ を得る。これらの評価値では評価関数として、

$$E = \frac{w_1}{\eta_1} + \frac{w_2}{\eta_2} \quad (2)$$

を用いた。ここで、 η_1, η_2 はそれぞれ波長 λ_1, λ_2 の入射光の入射パワーに対して、焦点面上に定義した領域 A に集光するパワーの割合、

$$\eta = \frac{\int_A |u_{out}(r)|^2 dr}{\int_\infty |u_{in}(r)|^2 dr} \quad (3)$$

であり、集光効率と呼んでいる。また w_1, w_2 は荷重である。この二つの評価値から、Fig 1 に示したとおり、修正ベクトル M を求め、 M にゲイン係数 g を掛けて T から減じ、 T を修正する。以上を反復して $E(T)$ が最小となる様に厚さ分布 T を最適化する。

本研究で用いた主なパラメータを Table I に示す。ひとつの入射光として赤外の YAG レーザ光を想定し、もうひとつの光として He-Ne レーザによるガイド光を想定している。これらの光は、ビーム径 2.0mm のガウスビームとして入射するものとし、焦点面上の直径 $80\mu\text{m}$ の領域への集光効率の最適化を行った。

Table I: Parameters used for designing the diffractive lens

| | |
|--|-------------------------|
| Focal length | 100[mm] |
| Number of sampling | 1024 |
| Sampling pitch | 5 [μm] |
| Wavelength $\lambda_1 (= \lambda_{ref})$ | 1.064 [μm] |
| Wavelength λ_2 | 633 [nm] |
| Refractive index $n(\lambda_1) = n(\lambda_2)$ | 1.5 |

初期値として、 λ_1 に対するフレネルレンズの厚さ分布を用い、評価値が一定値に収束するまで修正を加えた。 $w_1=1$ として w_2 を変えた時の収束時の集光効率を Fig 2 に示す。

この結果から、 w_2 の値を増加させるに従って、He-Ne レーザの集光効率は減少し、YAG レーザの集光効率は増加することがわかる。 $w_2=5$ の場合について、相対的厚さ分布の初期値、最適化後の DOE の相対的厚さ分布、He-Ne レーザ光、及び YAG レーザ光の焦点面強度分布をそれぞれ Fig 3(a)-(d) に示す。この

時、得られた He-Ne レーザ光の集光効率は 54.1% で、YAG レーザ光の集光効率は 88.9% であった。

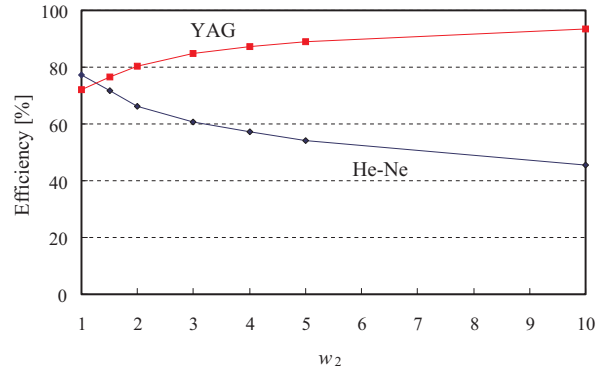


Fig 2: One-dimensional focusing efficiency vs. the weight w_2 . $c = 1 \times 10^{-5}$. $g = 7 \times 10^{-4}$.

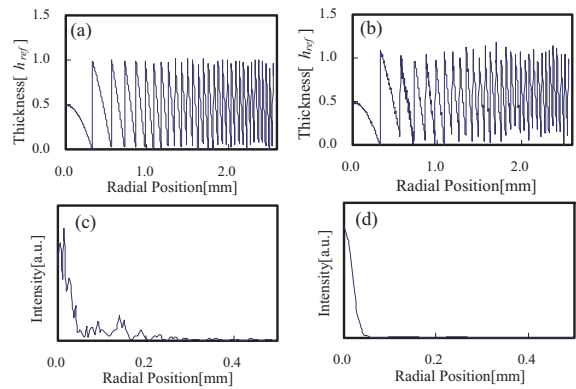


Fig 3: Initial (a) and final (b) thickness distribution of DOE, and intensity distribution of He-Ne (c) and YAG (d) lasers on focal plane.

3 まとめ

DOE の新しい最適化法として SPA を提案し、それによって二波長回折レンズの設計を行った。その結果、評価関数を設定できない反復フーリエ変換法に対し、SPA は評価関数を設定できる利点があり、かつ高速な処理が可能であることから、DOE の最適化アルゴリズムとして有望であることが確認できた。

参考文献

- [1] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney: Appl. Opt. **26**, (1987)2788.
- [2] F. Wyrowski: Appl. Opt. **28**, (1989)3864.
- [3] Y. Maeda, H. Hirano, and Y. Kanata: Neural Networks **8**, (1995)251.
- [4] 松島: 関西大学工業技術研究所「技苑」**109**, (2001)9.