

確率的二分探索法を用いた多目的光軸自動調整手法の提案と検証

村田 信治[†] 野里 博和^{††}
古谷 立美[†] 村川 正宏^{††}

レーザシステムの光軸の位置と角度の同時調整は、従来の山登り法などでは困難である。そこで我々は、すでに遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整手法を提案したが、まだ解決すべき課題が2つあった。(1) 調整時間が長いこと (2) 調整精度がノイズの影響を受けることである。本研究では、これらの課題を解決するために、確率的二分探索法を用い、過去の探索履歴から探索点の評価値の加重平均値を算出することを特徴とする多目的光軸自動調整手法を提案する。提案手法を用いた調整実験の結果、調整時間を従来の3時間から12分へと大幅に削減した上で、ノイズの影響を軽減した精度の高い光軸の位置と角度の同時自動調整を実現した。

Automatic Multi-objective Adjustment for Optical Axes using Stochastic Binary Search Algorithm

NOBUHARU MURATA[†], HIROKAZU NOSATO^{††}, TATSUMI FURUYA[†]
and MASAHIRO MURAKAWA^{††}

It is difficult for conventional methods to automatically adjust the optical axes of laser systems. We have proposed a multi-objective automatic adjustment method for optical axes using genetic algorithms. However, there were still two tasks that need to be solved: (1) long adjustment time, and (2) adjustment precision due to noise. In order to solve these tasks, we propose an automatic multi-objective adjustment method for the optical axes of laser systems using stochastic binary search algorithm utilizing weighted average evaluation values. Adjustment experiments with the proposed method demonstrate that the adjustment time could be reduced from 3 hours to 12 minutes and robust and efficient adjustment for positioning and angles of the optical axes could be realized.

1. はじめに

レーザシステムにおいて、光軸の位置と角度の調整は必要不可欠である。なぜならば光軸が外乱等によりずれるとシステムの性能が低下してしまう。しかしながら、光軸の位置と角度の調整は非常に困難である。この理由は、調整箇所は一般的に多自由度で相互依存の関係にあり、また、調整目的である光軸の位置と角度にはトレードオフの関係が成り立っているからである。そこで我々は、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた多目的光軸自動調整手法を提案し、光軸の位置と角度の自動調整を3時間程度で行うことに成功している。しかしながら、まだ解決すべき課題が2つあ

た：(1) 調整時間が長いこと、(2) 調整精度がノイズの影響を受けることである。そこで本研究では、これらを解決するために次の2つの特徴を持つ多目的光軸自動調整手法を提案する。

(1) 調整手法に確率的二分探索法¹⁾を用いる。これは探索履歴を二分木として保持し、探索が進むにつれ徐々に大域探索 (Exploration) から局所探索 (Exploitation) へ移行する。

(2) 探索履歴に保持されている探索点の評価値から加重平均値を計算し、その値を次の探索点を決定するための評価値として用いる。

これらの特徴から、提案手法を用いることで調整時間を短縮し、ノイズ環境下においても最適な調整が期待できる。提案手法を用いた実験の結果、調整時間は12分になりGAを用いた従来手法と比べ93%もの削減を実現した。さらに、ノイズの影響を軽減し精度の高い調整が行えることを確認した。

[†] 東邦大学大学院 理学研究科
Faculty of Science, Graduate School of Toho University
^{††} 産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター
ASRC, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

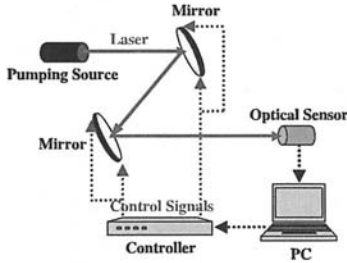


図1 光軸自動調整システム

Fig. 1 Automatic adjustment system for optical axes.

2. 多目的光軸調整

2.1 光軸自動調整システム

光軸の位置と角度はそれぞれ2自由度あるため、これらを調整するためには最低4箇所の調整箇所が必要になる。そこで、4自由度を調整可能な自動調整システムをすでに開発した²⁾。このシステムは、図1で示すようにステッピングモータが取り付けられた2箇所調整可能なミラー2枚（調整箇所は計4箇所）と、ステッピングモータを制御するコントローラ、光軸の状態を検出するための光軸検出センサで構成される。

この光軸調整システムでは、調整精度に影響を与えるノイズ源が2つある。1つは、評価系のノイズであり、光源自身の安定性や外乱（温度変化、大気ゆらぎ）、光軸検出センサのノイズが含まれる。もう1つは、駆動系のノイズである。このノイズにより、ミラーを制御するためのステッピングモータやミラーホルダの位置再現性が失われてしまうため、過去の光軸の状態を再現しようとしても実際の光軸がずれてしまう。

開発したシステムにおいて、これらのノイズをRMS（平均自乗平方根）値で観測した結果を表1に示す。光軸の調整は時にこれら2つのノイズを考慮しなければならない。

2.2 多目的光軸自動調整手法

山登り法などの従来手法では、光軸調整は非常に困難であるため、我々は近傍培養型遺伝的アルゴリズム（Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm: NCGA）³⁾を適用した多目的光軸自動調整手法を提案した²⁾。実験の結果、従来では困難だった光軸の位置と角度の同時自動調整を3時間程度で実現できた。

表1 ノイズの影響による精度誤差
Table 1 Precision error influenced by noise.

	Positioning	Angle
Error caused by noise (1)	18.1 μ m	0.5°
Error caused by noise (2)	129.5 μ m	0.4°

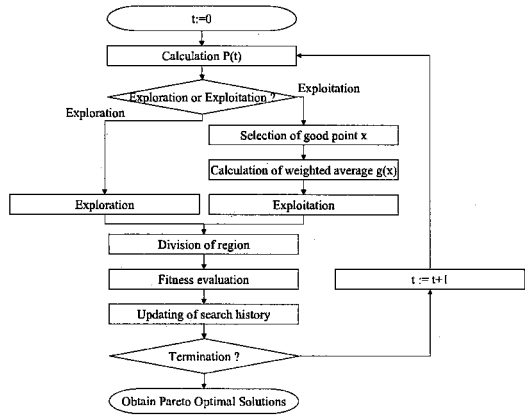


図2 提案手法のフローチャート

Fig. 2 Flowchart for the proposed method.

しかしながら、まだ2つの課題がある。

(1) 長い調整時間

これは、GAが探索終盤においてもステッピングモータの移動量が多い大域探索を行うことによる。なぜなら、調整に要する全時間のうち、ほとんどはステッピングモータの移動時間であり、その移動量に比例してこの移動時間が増加する。

(2) ノイズの影響により安定した光軸調整が困難

前節で説明した2つのノイズの影響を受けるため、実際には精度が悪い解がたまたま精度が良い解として扱われてしまい、そのまま最終結果にまで残ってしまうことによる。

3. 提案手法

本研究では、光軸の位置と角度をノイズの影響を受けずに効率的に自動調整するために、過去の探索履歴から計算された探索点の評価値の加重平均値を用いた確率的二分探索法（Stochastic Binary Search Algorithm utilizing weighted average evaluation value: 以下BSWと略す）を提案する。提案手法を用いて、光軸の位置誤差と角度誤差に関するパレート最適解集合を得る。本提案手法は探索空間を分割することで効率的な探索を可能にし、さらに加重平均値を用いることでノイズの影響を軽減した光軸の調整が可能となる。このフローチャートを図2に示す。

3.1 確率的二分探索法

確率的二分探索法（Stochastic Binary Search Algorithm:BSA）¹⁾は、探索空間を分割しながら探索を行うアルゴリズムであり、探索空間の分割過程や探索履歴は二分木によって管理される。BSAでは、式(1)

の遷移関数 $P(t)$ の確率で大域探索、それ以外の場合
は局所探索を探索毎に選択し繰り返す行う。

- **大域探索:** 探索空間内で一度も探索されていない
最も広い領域から探索点 x^t を生成する。
- **局所探索:** これまでに得られた探索点の中から決
定された有望点の周辺の領域から探索点 x^t を生
成する。

$$P(t) = (C-1) \frac{\tanh(\frac{t/N-K}{\sigma}) - \tanh(\frac{-K}{\sigma})}{\tanh(\frac{1-K}{\sigma}) - \tanh(\frac{-K}{\sigma})} + 1(1)$$

C は大域探索を行う最小確率、 σ は大域探索から局所
探索に移行する速さ、 K は変曲点の位置、 N は探索
の打ち切り回数 (t の上限値) である。

探索点 x^t の生成後、大域探索または局所探索で決定
された領域を超立方体性の度合い $H(= d_{max}/d_{min})$
の値が最も 1 に近くなる (超立方体に近い) 座標軸に
対して 2 分割する。 d_{max} は分割後の 2 つの領域の最
も長い辺の長さ、 d_{min} は最も短い辺の長さである。ま
た本研究では、探索点 x^t は調整システムのミラーを
動かすための 4 つのステップモータの座標 (x_1^t ,
 x_2^t , x_3^t , x_4^t) を表す。探索点 x^t とそのときに計測さ
れた光軸の位置誤差 f_1^t , 角度誤差 f_2^t は探索履歴 $F(t)$
に保持される。

$$F(t) = \{(x^1, f_1^1, f_2^1), (x^2, f_1^2, f_2^2), \dots, (x^t, f_1^t, f_2^t), \dots, (x^t, f_1^t, f_2^t)\} \quad (2)$$

BSA の特徴は (1) 大域探索から局所探索に確率的
に徐々に遷移していく、(2) その時点までの探索履歴
をすべて保持していることである。これにより、以前
に探索した領域は重複して探索せず、また探索終盤に
大域探索を行わなくなるので光軸の調整時間を大幅に
短縮することが可能となる。

3.2 加重平均値を用いた適応度推定

ノイズの影響を受ける探索問題に対し、従来では同
一の探索点を複数回評価した結果の平均値を評価値と
して使用するのが一般的である。しかしながら、レー
ザシステムの光軸調整にこの手法を適用することは現
実的ではない。なぜなら、モータの移動量が増加する
ためそれに比例して調整時間も増加するからである。

この問題を解決するために、過去の探索点の履歴か
ら計算される加重平均値を評価値として使用する。こ
の手法と BSA は良好な組み合わせである。なぜなら
BSA は過去の探索履歴をすべて保持しているため、す
でに蓄積した情報を利用して真の評価値の推定を行え
るからである。

本研究における光軸調整では、探索点 x^t における
光軸の位置誤差 f_1^t , 角度誤差 f_2^t は、ある点 x から x^t
までの距離 d_t に比例して単調増加または単調減少す

ると近似する。ノイズに関しては、評価系のノイズと
駆動系のノイズの和が平均値 0 の正規分布に従うも
のと仮定する。このとき、 $f_1(x)$, $f_2(x)$ の最尤推定量
 $g_1(x)$, $g_2(x)$ は次式で計算される。

$$g_i(x) = \frac{f_i(x) + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^k} f_i^t}{1 + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^k}}, \quad (3)$$

$$d_t = |x - x^t|, \quad (4)$$

$g_1(x)$, $g_2(x)$ は探索点 x の光軸の位置誤差の加重平
均値、角度誤差の加重平均値であり、 f_1^t , f_2^t は x^t
の評価値つまり、光軸の位置誤差と角度誤差である。
 $f_1^T = f_1(x)$, $f_2^T = f_2(x)$, $x^T = x$ であり、 k は評価
値の減衰度とノイズの大きさによって定まる比例定数
である。この加重平均値を前述した BSA の局所探索
の有望点の決定時に使用する。

4. 光軸自動調整実験

4.1 実験内容

提案手法の有効性を確認するために、従来手法であ
る GA を用いた多目的光軸自動調整、加重平均値を用
いない BSA による多目的光軸自動調整、提案手法で
ある BSW を用いた多目的光軸自動調整の 3 つの実験
を行った。実験には 2.1 節で説明した多目的光軸自動
調整システムを使用し、調整変数は 4 つのステップ
モータの各座標値で各探索範囲は -128~127、目的
関数は光軸の位置誤差と角度誤差とし、これらの誤差
が 0 になるように調整を行う。

調整終了後、得られたパレート最適解集合をもとに
ステップモータを動かし光軸を再セットし、光軸
の位置誤差と角度誤差を再評価する。このとき、観測
精度の信頼性を高めるために 10 回評価の平均値を再
セット後の評価値とする。ここで、この再評価は 3 つ
の手法の性能比較の信頼性を高めるために行うもので
あり、実際の BSW の調整時には同一点の複数回評価
は行っていないことに留意されたい。

なお、実験結果の比較手段として Attainment sur-
face (到達面) を使用する⁴⁾。これは得られたパレ
ート最適解集合が支配する領域とそうでない領域の境界
であり、調整後の精度の到達面を知ることができる。

4.2 実験結果

実験結果を表 2 と図 3~6 に示す。表 2 は 5 試行の
平均調整時間である。図 3 は 5 試行から得られたすべ
てのパレート最適解集合の中位の到達面であり、50%
の確率でその手法が到達可能な解の精度であることを
表す⁴⁾。図 4, 5, 6 はそれぞれ従来手法, BSA, BSW

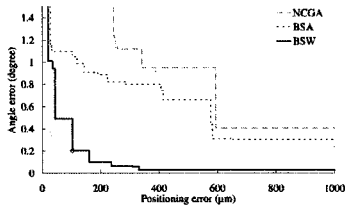


図3 中位の到達面の比較

Fig. 3 Comparison of medium attainment surfaces for three methods.

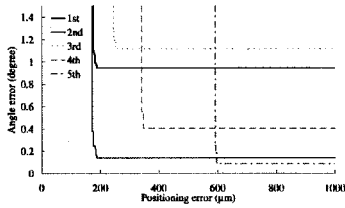


図4 従来手法の調整結果

Fig. 4 Adjustment results for the conventional method.

を用いた5試行の各到達面である。

まず表2より、確率的二分探索法を用いることで調整が12分で完了しており、従来手法と比べ調整時間を93%削減することに成功していることがわかる。次に図3を見ると、提案手法の到達面が支配する領域内に他の手法の到達面があることが確認でき、提案手法が他の2手法よりも光軸の位置誤差、角度誤差のいずれに関しても良い調整精度が得られていることがわかる。また図4~6から確認できるように、従来手法とBSAは試行毎に結果がばらついているのに対し、提案手法はノイズの影響を軽減した安定した調整を行っている。

5. おわりに

本研究では、探索履歴の評価値から求めた加重平均値を使用した確率的二分探索法を用いた効率的な光軸自動調整手法を提案した。4自由度の光軸調整実験の結果、従来手法と比べ調整時間を93%削減し12分という短時間で光軸の位置と角度の自動調整を完了できた。さらに、加重平均値を用いることでノイズの影響を軽減した自動調整を行えることが確認できた。これ

表2 調整時間の比較

Table 2 Comparison of adjustment time.

	time (min)
MOGA(conventional method)	180
BSA	12.5
BSW(proposed method)	11.9

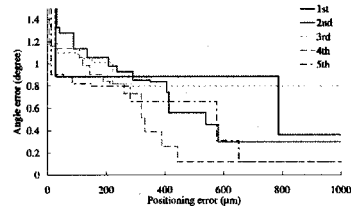


図5 BSAの調整結果

Fig. 5 Adjustment results for the BSA.

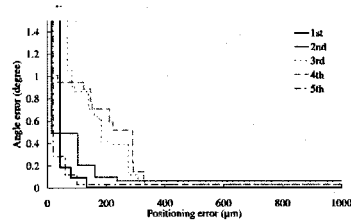


図6 BSWの調整結果

Fig. 6 Adjustment results for the BSW.

により、ノイズ環境下の多目的光軸調整において提案手法が有効であることを実証した。

今後の課題としては、より多数の調整箇所を持つレーザシステムの調整において提案手法の有効性を検証することである。また本手法はレーザシステムの調整のみならず、ノイズのある評価関数をもつ工学システムの調整全般に適用することで、短時間かつノイズの影響を受けにくい安定した調整の実現が期待できる。

謝辞 本研究は、「平成16年度 NEDO 産業技術研究助成事業」および、「平成17年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費)」により実施した。

参考文献

- 1) Hughes, E. J.: Multi-objective Binary Search Optimisation, *Proceedings of Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimisation (EMO 2003)*, pp. 102-117 (2003).
- 2) 村田信治, 野里博和, 村川正宏, 古谷立美: 遺伝的アルゴリズムと簡易光軸センサを組み合わせた多目的光軸自動調整システム, *情報処理学会論文誌, 数理モデル化とその応用*, Vol. 47, No. SIG14(TOM15), pp. 152-160 (2006).
- 3) 渡邊真也, 廣安知之, 三木光範: 近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化, *情報処理学会論文誌, 数理モデル化とその応用*, Vol. 43, No. SIG10(TOM7), pp. 183-198 (2002).
- 4) Knowles, J., Thiele, L. and Zitzler, E.: A Tutorial on the Performance Assessment of Stochastic Multi-objective Optimizers, 214, *Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), ETH Zurich, Switzerland (2006)*. revised version.