
日本知能情報ファジィ学会誌

Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics

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^{*1}・野里 博和^{*2}・古谷 立美^{*1}・村川 正宏^{*2}

本論文では、過去の探索履歴から探索点までの距離に基づく加重平均を導入した確率的二分探索法を提案し、レーザシステムの光軸の位置と角度の多目的調整に適用して調整時間の大幅な短縮と調整精度の向上を図り、この効果を定量的に評価する。本研究において、確率的二分探索法を用いることで調整時間の大幅な短縮が可能になり、加重平均値を調整手法の評価値に用いることによりノイズの影響を軽減した調整が可能になる。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多目的自動調整を実現した。

キーワード：光軸，自動調整，二分探索，ノイズ，加重平均，多目的最適化

1. はじめに

現在、産業分野において使用されているレーザシステムでは、一般的にレーザ光の位置と平行性が非常に重要である。しかしながら、レーザシステムでは、長時間の使用や外乱により光軸の位置がずれ、平行性が失われてしまう。このためレーザシステムの性能が低下してしまうので、そのたびに光軸の位置と角度を調整しなければならない。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。なぜなら、(1)調整箇所が多自由度で相互依存がある、(2) μm の調整精度が必要である、(3)調整目的である光軸の位置と角度はトレードオフの関係にあるからである。そのため、光軸の調整は専門の技術者によって行われており、調整コストがかかってしまう。そこで我々はこれまでに遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)[1]を用いた多目的光軸自動調整手法を提案した[2]。これにより、光軸の位置と角度の多目的自動調整を3時間で行うことに成功している。しかしながら、これにはまだ2つの課題があった。1つ目は、調整時間をさらに短縮することである。なぜなら実際のレーザシステムでは、レーザシステムを起動する度に光軸の調整を行うので調整時間が長いと実用的ではなく、可能な限

り短いことが望ましい。2つ目は、調整システムの評価系や駆動系などのノイズの影響により、調整精度が悪くなることである。

そこで本研究では、これらの問題を解決するために、次の2つの特徴をも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[3]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。大域探索は探索空間の中で今までに探索されていない領域から探索を行う。局所探索は今までに探索した探索点の中から有望点を決定し、その有望点の周辺から探索を行う。これにより、従来手法と比べ調整時間の短縮が期待できる。なぜなら、確率的二分探索法は以前に探索した領域は重複して探索せず、また探索の終盤に大域探索を行わないからである。
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。従来では評価値のノイズの影響を軽減するには、同一の探索点を複数回評価し、得られた評価値の平均値を使用していたため調整時間が増加してしまう。これに対し、探索履歴からの加重平均値を用いると同一の探索点の評価回数は1回でよいので調整時間を短縮することができる。さらに、ノイズ環境下においても最適な調整が期待できる。なぜなら、ノイズの影響を軽減した調整により初期収束や局所解に陥らないからである。

[†] Automatic Multi-objective Adjustment for Optical Axes using Stochastic Binary Search Algorithm
Nobuharu MURATA, Hirokazu NOSATO, Tatsumi FURUYA and Masahiro MURAKAWA

*1 東邦大学大学院理学研究科情報科学専攻
Faculty of Science, Graduate School of Toho University

*2 産業技術総合研究所情報技術研究部門
ITRI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

提案手法を用いた自動調整システムでの実験の結果、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われていることを確認した。

本論文では、初めに2章で従来の光軸自動調整システムについて説明する。次に、3章で提案手法について述べる。4章で実験に用いる光軸自動調整システムと発生するノイズ源について説明する。5章では提案手法による光軸自動調整実験結果を述べ、最後に、6章で今後の課題について述べる。

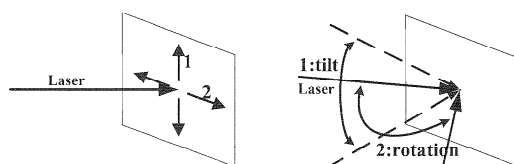
2. 多目的光軸自動調整システム

本章では、従来の光軸自動調整システムと多目的光軸自動調整手法について説明する。

2.1 光軸自動調整システム

レーザシステムを運用する際には、光軸の位置と角度の調整が必要不可欠である。なぜなら、外乱により光軸の位置と角度がずれるとレーザシステムの性能が低下してしまい、レーザシステムの運用に支障をきたすためである。そのため、光軸がずれるたびに調整を行わなければならない。

光軸の位置と角度を調整するためのシステムについて説明する。図1で示すように光軸の位置が2自由度、角度も2自由度であるため、一般的に光軸の位置と角度を調整するためには最低でも4箇所の調整箇所が必要である。そこで、図2で示す構造を持つ4自由



(a) DOF for positioning of optical axes. (b) DOF for angle of optical axes.

図1 光軸の自由度

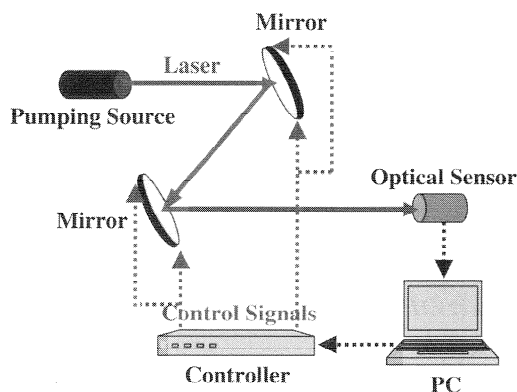


図2 光軸自動調整システム

度の自動調整システムをすでに開発した[2]。このシステムは、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、光軸検出センサで構成される。このシステムを用いてステッピングモータを制御し、光軸の目標状態からの位置誤差と角度誤差が0となるように調整を行う。

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つめは、評価系のノイズである。このノイズには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。2つめは、駆動系のノイズである。これにより、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。そのため、仮に光軸の初期位置とモータの移動量が同じでも、実際の光軸の変化量は一定でないため、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。したがって、光軸の調整は時にこれら2つのノイズ源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、以下の2つの理由により光軸の調整が非常に困難である。

1. 多自由度調整

光軸を調整するためには多数の調整箇所が必要でありそれらは相互依存関係にある。そのため、調整結果が局所解に陥ってしまう。

2. トレードオフ

一般的に光軸の調整では、光軸の位置と角度を調整する必要があり、これらはトレードオフの関係が成り立っている。

この問題を解決するために、すでに我々は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[2]。具体的には、GAには近傍培養型遺伝的アルゴリズム(Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm: NCGA)[4]を適用し、染色体には4つのステッピングモータの移動量、適応度は光軸検出センサから検出される目標状態からの位置誤差と角度誤差とした。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時間で実現できた。しかしながら、まだ2つの課題がある。

1. 長い調整時間

この理由として、GAは探索終盤でも大域探索を行うためである。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は増加する。このため、探索終盤でステッピングモータの移動量が多い大域探索を行うのは調整効率が悪い。

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つのノイズ源の影響を受けるため、探索が初期収束や局所解に陥ってしまうことがある。これは、実際には精度が悪い解が2つの前述したノイズの影響により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があるためである。

3. 提案手法

本論文では、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 values; 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。パレート最適解集合とはある目的関数を良くするとそれ以外の目的関数が悪くなる解の集合である[5]。本提案手法は探索空間を分割、管理することで効率的な探索を可能にし、さらに調整の評価値に探索履歴から計算された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3に示し、以下に具体的な説明をする。

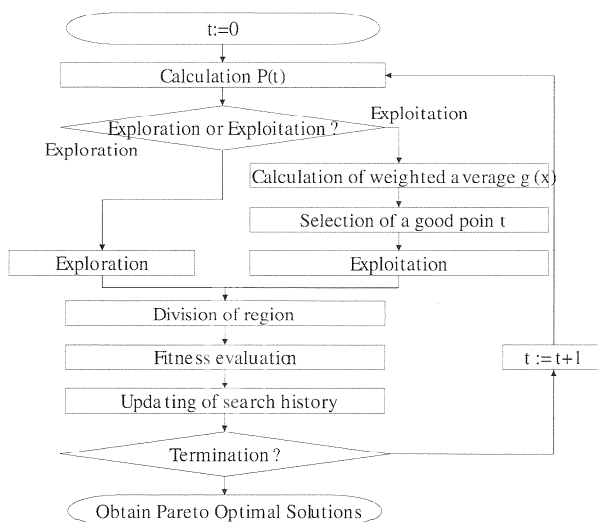


図3 提案手法のフローチャート

3.1 確率的二分探索法

確率的二分探索法(Stochastic Binary Search Algorithm: BSA)[3]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の基本探索アルゴリズムは大域探索(Exploration)と局所探索(Exploitation)のどちらかをステップ毎に選択し繰り返し行うことである:

- **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 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 を生成する。

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つのステッピングモータの座標 $(x_1^t, x_2^t, x_3^t, x_4^t)$ を表し、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。

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

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)いままでに探索した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、また探索終盤で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。具体的な流れを説明する。

1. 基本探索アルゴリズムの決定

探索点 x^t を生成するために、次式の遷移関数 $P(t)$ に従った確率で大域探索を行い、それ以外の場合は局所探索を行う。

$$P(t) = (C - 1) \frac{\tanh(\frac{t/N - K}{\sigma}) - \tanh(\frac{-K}{\sigma})}{\tanh(\frac{1-K}{\sigma}) - \tanh(\frac{-K}{\sigma})} + 1 \quad (2)$$

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(繰り返し回数 t の上限値)である。 $C=0.02$, $\sigma=0.01$, $K=0.4$, $N=300$ とした場合の $P(t)$ を図4に例示する。

2. 大域探索

大域探索は、探索履歴の中でこれまでに一度も探索されていない領域から最も広い領域を決定す

る。決定された領域内でランダムに探索点 x^t を生成する。具体的に、2次元のときの大域探索を図5に例示し説明する。この探索空間のなかで、領域Aがまだ探索されていない領域の中の一番広い領域である。そのため、領域Aが大域探索での探索対象領域として選択され、その領域Aの中で探索点 x^t がランダムに生成される。

3. 局所探索

局所探索では、まず探索履歴の中から N_p 個を重複しないようにランダムに選択し、それぞれの加重平均値(3.2節で後述する)を算出する。算出された加重平均値に従い N_p 個に優劣をつけパレート最適解集合を選出し、その中からランダムに選択した1個を有望点とする。次に、有望点を中心とし、各座標軸に対し $2d_p$ の広さの局所領域を作成する。局所領域の作成後、局所領域と交わる領域を選出する。最後に、選出された領域の中から一番広い領域を決定し、その領域内にランダムに探索点 x^t を生成する。この局所探索を図6を用いて具体的に説明する。この図は、2次元空間での局所探索を例示したものである。選択された有望点を基準に局所領域を作成し、この局所領域と

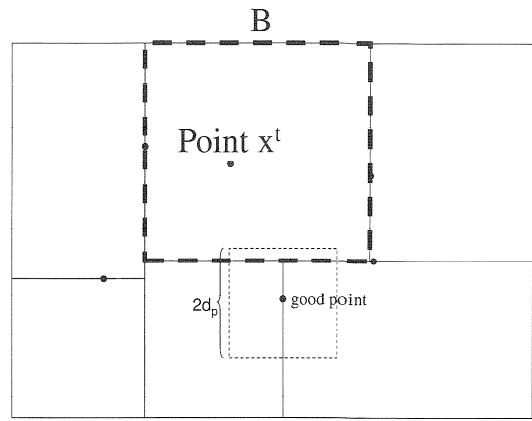


図6 局所領域の作成

交わる領域を選出する。局所領域と交わる領域は3つあり、その中で一番広い領域は領域Bであるので、領域Bの中で探索点 x^t をランダムに生成する。

4. 領域分割

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ある座標軸に対して2分割する。本研究では調整変数が4、つまり4次元の探索空間なので、4通りの分割方法の中から1通りを決定し分割を行う。このとき、分割後の領域が超立方体に近い領域となるような座標軸を選択する。具体的には(3)式を用いて4通りの超立方体性の度合い H を算出し、 H の値が最も1に近くなる座標軸に対して2分割する。

$$H = \frac{d_{max}}{d_{min}} \tag{3}$$

式中の d_{max} は分割後の2つの領域の最も長い辺の長さ、 d_{min} はもっとも短い辺の長さである。 H が1に近いほどより超立方体に近い領域となる。

5. 評価

本手法では、生成した探索点 x^t が表すステップングモータの座標値によりミラーを動かした後、評価値である光軸の位置誤差 f_1 と角度誤差 f_2 を得る。 f_1 の単位は μm 、 f_2 の単位は $^\circ$ であり、光軸検出センサの受光面上での X 、 Y 座標と受光面でのレーザの光強度から算出できる[2]。

6. 探索履歴の更新

最後に、探索履歴に生成した探索点 x^t の情報と領域分割情報を追加し、探索履歴の更新を行う。この探索履歴である二分木の更新例を図7に示す。ノード2の領域内に探索点が生成され領域が分割された場合、ノード2に探索点と評価値が追加され、分割された2つの領域のノード(ノード

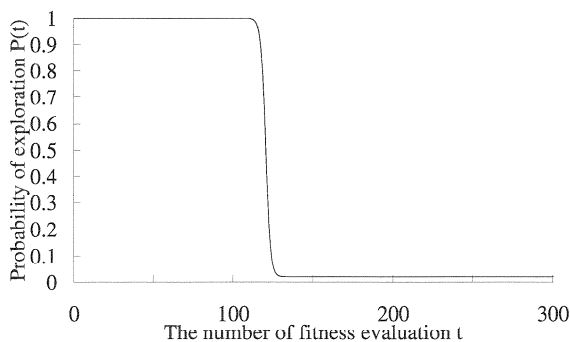


図4 遷移関数

($C = 0.02$, $\sigma = 0.01$, $K = 0.4$, $N = 300$)

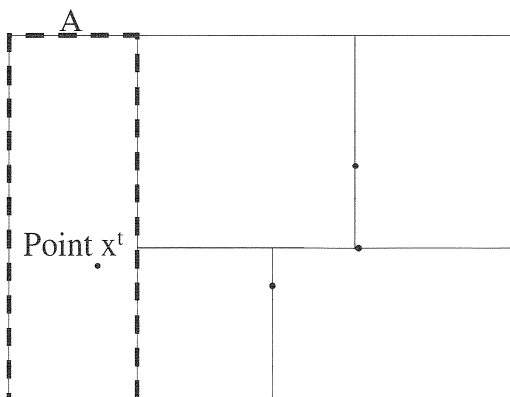


図5 大域探索

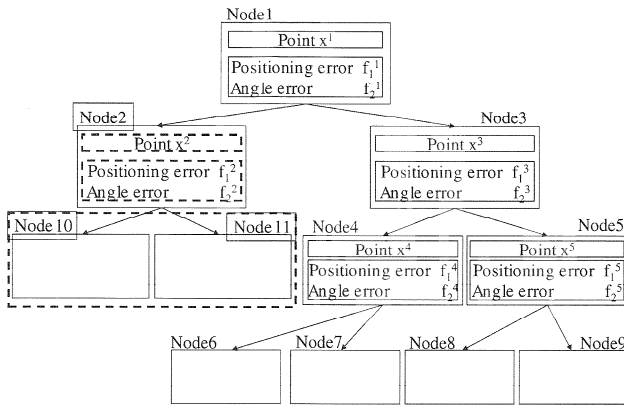


図7 探索履歴の更新

10, ノード11)がノード2の子ノードとして追加される。

以上の1~6の操作を評価回数が N 回になるまで繰り返す。

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[6, 7]。しかしながら、この手法ではレーザシステムの光軸調整において調整時間が増加してしまうので現実的ではない。なぜなら、評価系と駆動系のノイズを軽減するためには、ステッピングモータを移動させセンサで検出するというプロセスを一評価とし、これを複数回行う必要がある。仮に N 回同一点の評価をとった場合は、調整時間が N 倍になってしまう。

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。発生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。

$$g_1(x) = \frac{f_1(x) + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^2} f_1^t}{1 + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^2}}, \quad (4)$$

$$g_2(x) = \frac{f_2(x) + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^2} f_2^t}{1 + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{1+k \times d_t^2}}, \quad (5)$$

$$d_t = |x - x^t|, \quad (6)$$

$g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 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。

この手法を適用することで利点が2つ生じる。1つめは、ノイズによる初期収束を防ぐことが可能である。2つめは、同一探索点に対して評価回数が1回だけで済むということである。したがって、この手法によりノイズの影響を抑え効率的な光軸調整が可能となる。

4. 光軸自動調整システムとノイズ源

本章では、本研究で使用した光軸自動調整システムとそのシステムにおけるノイズ源について説明する。

4.1 実験システム

実験にはすでに開発した図8の多目的光軸自動調整システム[2]を使用する。このシステムは図2に示した構造になっている。以下に構成を簡単に説明する。

- ・制御装置 (Motor controller)
ミラーを制御するための制御装置には、ステッピングモータドライバと0.075 $\mu\text{m}/\text{step}$ の分解能を持つミラーホルダシステムを用いた。ステッピングモータの移動時間は13msec/stepであり、光軸を評価するときには最大で約4secかかる。
- ・評価装置 (Sensor)
評価装置には、光軸検出センサ[2]を用いた。光軸検出センサは2次元PSDの前に透過率50%の穴あきNDフィルタを設置したもので、位置分解能1.39 μm でセンサの受光面上での光軸のX、Y座標値を検出可能である。また、レーザの光強度も検出可能であり、光軸が平行に入射しNDフィルタの穴を通過したとき光強度が最大となるので、光軸の角度を評価することが可能である。
- ・光源 (Pumping source)
光源には、ビーム径2mmのJDS Uniphase社のHe-Ne Laser (1125P)を用いた。この光源のビー

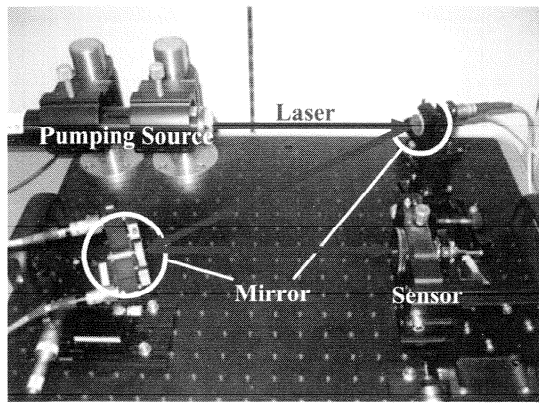


図8 実験システム

ム指向度安定性は 0.02mrad で、光源から評価装置までの光路長は 800mm である。

・ PC

3章で説明したフローがこのPCで実行される。このPCのスペックはCPU: Celeron 700MHz, メモリ: 128MB, OS: Windows 2000 である。

4.2 ノイズ源

2章で述べた2つのノイズ: (1) 評価系のノイズ, (2) 駆動系のノイズの影響により位置誤差, 角度誤差がどの程度生じるか検証するために, 前節で説明した光軸自動調整システムを使用してノイズの大きさを計測した。ノイズの大きさはRMS(平均自乗平方根)で算出する。具体的には, 基準値と実測値との誤差の自乗加算平均の平方根で求める。計測方法は, 以下の通りである。

1. 評価系のノイズ

光軸をセンサの受光面上の中心で平行な状態にセットし, そのままの状態でももせずに光軸の位置誤差と角度誤差の計測を1時間行った。このときの計測回数は約44600回であった。

2. 駆動系のノイズ

光軸の初期状態をセンサの受光面上の中心とする。4つのステッピングモータの移動量をランダムに決定し, モータを動かす。ランダムに動かし後, 光軸を初期状態に戻しセンサで光軸の位置誤差, 角度誤差を評価する。これを1時間繰り返し計測した。このときの計測回数は約720回であった。

それぞれの誤差を表1に示し, 評価系のノイズの発生頻度のグラフを図9, 駆動系のノイズの発生頻度のグラフを図10に示す。図9, 10からノイズは正規分布

表1 ノイズの影響による精度誤差

	Positioning	Angle
Error caused by noise (1)	$18.1\mu\text{m}$	0.5°
Error caused by noise (2)	$12.9\mu\text{m}$	0.4°

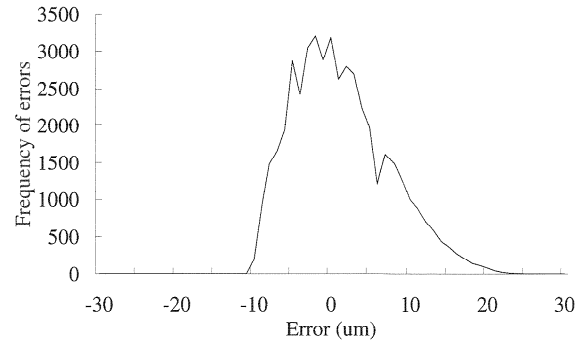


図9 評価系ノイズの発生頻度

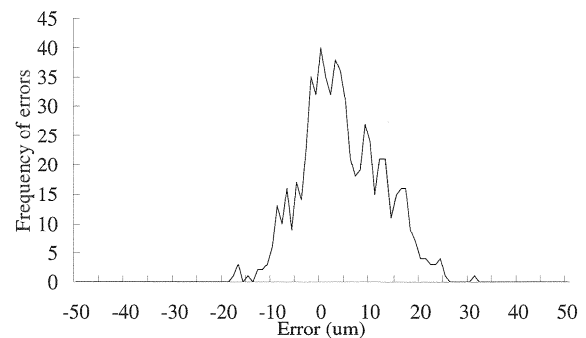


図10 駆動系ノイズの発生頻度

に近似でき, 3.2節で仮定した正規分布から大きくずれていないことがわかる。

5. 光軸自動調整実験

5.1 実験内容

実験では, 調整変数を2枚のミラーに取り付けられた4つのステッピングモータの初期位置からの変位量, 調整目的を光軸の位置誤差と角度誤差の2つとした。ステッピングモータの座標値はそれぞれ8ビットの整数なので, 探索範囲は4つの座標値がそれぞれ $-128 \sim 127$ となる。光軸の調整目標は, 理想的な状態: 光軸の位置誤差が0(受光面上の中心)で角度誤差が0(光軸検出センサへ入射する光軸がセンサ面に対し垂直)とした。光軸の初期状態は理想的な状態から光軸の位置を $\pm 5\text{mm}$, 光軸の角度を $\pm 5^\circ$ の範囲でランダムにずらした状態とし, 調整を開始した。実験は乱数のシードを変えてそれぞれ5試行を行った。

まず予備実験として, BSAにおける大域探索と局所

探索の効果を確認するための実験を行い、本実験では、提案手法の有効性を示すために、従来手法、BSA、提案手法を用いた多目的光軸自動調整実験を行った。

また、実験結果の比較手段としてAttainment surface(到達面)を使用した[8]。到達面と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。5試行し得られたパレート最適解集合の組から算出される中位の到達面は、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[8]。

5.2 大域探索と局所探索の効果

本提案手法における大域探索と局所探索の効果を確認するための予備実験を行った。具体的には、(1)探索のほとんどを大域探索に費やす大域探索BSW、(2)大域探索と局所探索の割合のバランスのとれたBSW、(3)探索のほとんどを局所探索に費やす局所探索BSWを用いた光軸自動調整実験である。これらのBSWは式(2)の遷移関数 $P(t)$ の K を変化させることで対応できる。各BSWの $P(t)$ のパラメータは表2であり、それぞれの $P(t)$ のグラフを図11に示す。

予備実験の結果を図12に示す。この図は、各手法の調整実験によって得られたパレート最適解集合から算出した中位の到達面である。この図から、バランスのとれたBSWに比べ、大域探索BSWと局所探索BSW共に得られた到達面の精度は悪いことが確認できる。この理由として、大域探索BSWに関しては、局所探索

表2 大域探索BSW、バランスのとれたBSW、局所探索BSWの $P(t)$ のパラメータ

	C	σ	K	N
大域探索 BSA	0.02	0.01	0.1	300
バランスのとれた BSW	0.02	0.01	0.4	300
局所探索 BSA	0.02	0.01	0.8	300

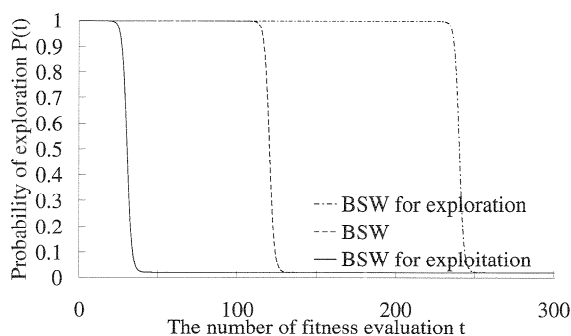


図11 大域探索BSW、バランスのとれたBSW、局所探索BSWの $P(t)$

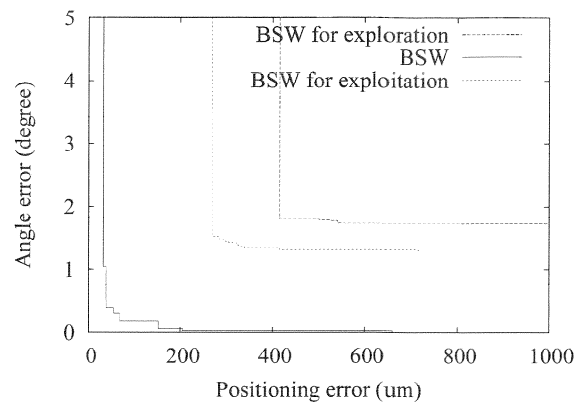


図12 大域探索BSW、バランスのとれたBSW、局所探索BSWの中位の到達面

が十分に行われず探索が不十分であったと考えられる。また、局所探索BSWに関しては、大域探索BSWとは逆に大域探索が十分に行われず探索空間全体の探索が不十分なため、局所解に陥ったと考えられる。これらの結果より、本実験における光軸の位置と角度の調整問題には局所解が存在することを確認し、BSWを用いる際には大域探索と局所探索の割合のバランスが重要であることがわかった。

5.3 多目的光軸自動調整実験結果

次に、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。本実験では調整終了後、得られたパレート最適解集合をもとにステッピングモータを動かし光軸を再セットした。再セット後、光軸の位置誤差と角度誤差を再評価した。このとき、再セット後の精度の信頼性を高めるために10回評価を行い、その平均値を再セット後の評価値とした。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ったものであり、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。それぞれの手法のパラメータは以下の通りである。

- ・従来手法：GAにNCGAを使用した。個体数は20、突然変異確率は0.05とし終了条件は3時間(遺伝的操作の繰り返し回数=約240回:評価回数=4820回)とした[2]。
- ・BSA： $P(x)$ のパラメータは図4に示したように、前節の予備実験の結果が最も良かったパラメータ、 $C=0.02$ 、 $\sigma=0.01$ 、 $K=0.4$ 、 $N=300$ とし、局所探索の選択個体数 $N_p=10$ 、終了条件は評価回数300とした。

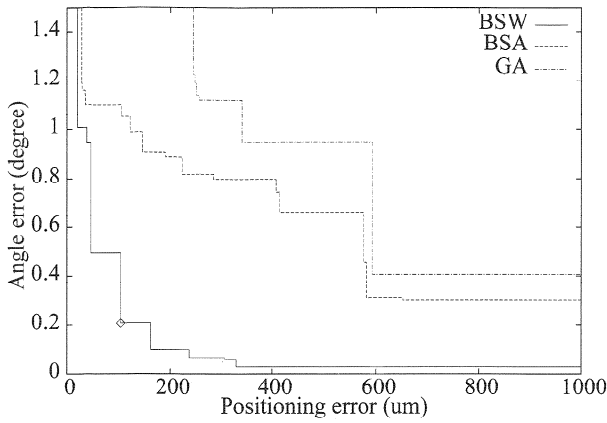


図13 再セット後の中位の到達面の比較

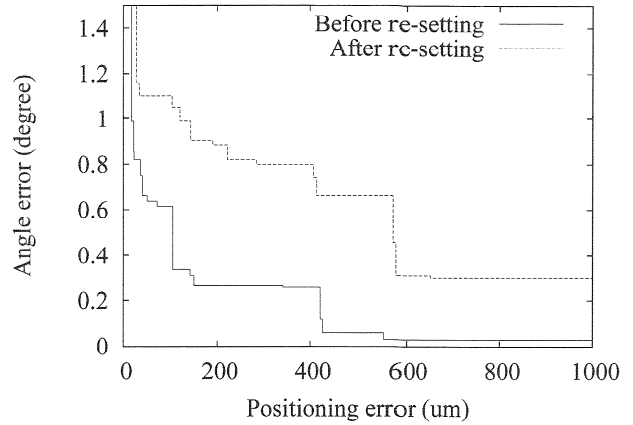


図15 BSAによる再セット前と後の調整結果

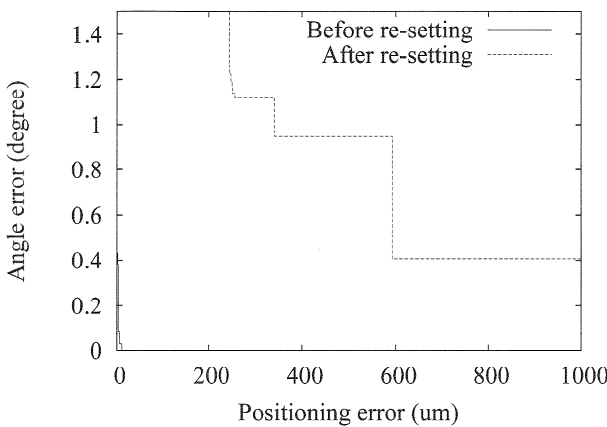


図14 従来手法による再セット前と後の調整結果

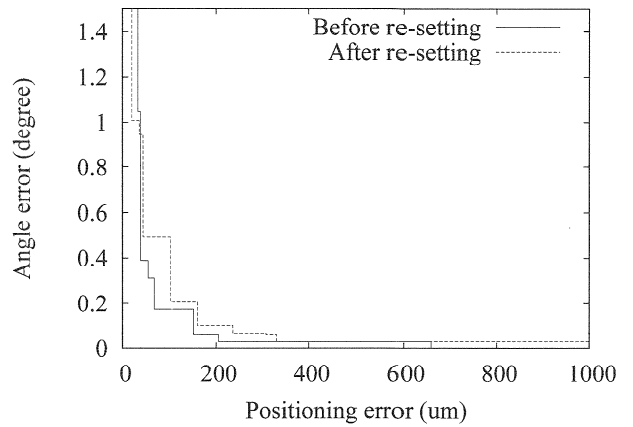


図16 BSWによる再セット前と後の調整結果

- ・ BSW : $P(x)$ のパラメータ, 局所探索の選択個体数, 終了条件はBSAと同様にし, 加重平均値算出のパラメータ $k=10$ とした.

実験結果を表3と図13~16に示す. 表3は5試行の平均調整時間である. 図13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を, 図14, 15, 16はそれぞれ従来手法, BSA, BSWにおける光軸の再セット前と後のパレート最適解集合から得られた中位の到達面をプロットしたものである.

表3 各調整手法の調整時間

	time (min)
MOGA(conventional method)	180.0
BSA	12.5
BSW(proposed method)	11.9

5.3.1 調整時間の比較

調整時間に関して, 表3を見ると, 確率的二分探索法を用いることで従来手法と比べ調整時間を93%削減することに成功し, 効率の良い調整ができていることがわかる. 具体的には, 従来手法は3時間かかっているのに対しBSA, BSWの調整時間は12.5分, 11.9分と約12分で完了している. これは確率的二分探索法は(1)以前探索した領域は重複して探索せず効率の良い探索が行われたことと, (2)探索が進むと大域探索から局所探索へ移行していくので, GAと違い探索の終盤では大域探索を行わなくなり探索終盤での探索効率が改善された結果である.

5.3.2 調整精度の比較

調整精度に関して, 図13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る. 提案手法が他の2手法よりも光軸の位置誤差, 角度誤差のいずれの評価関数に関しても良い調整精度が得られている. 例えば, 図13のグラフの中でポイント(◇)で示した提案手法のパレート最適解の1

つに光軸を再セットしたとき、光軸の位置誤差は $100\mu\text{m}$ 、角度誤差は 0.2° となり、ビーム径 2mm に対し5%しかずれておらず十分な精度であることが分かる。次に、それぞれの手法の結果を個別に見ると、従来手法とBSAでは図14, 15から確認できるように、ノイズの影響により光軸の再セット後の到達面は再セット前のものより悪くなっている。特に、調整時間が長い従来手法は駆動系のノイズの影響を大きく受けるため、再セット後の到達面の精度が大幅に悪くなっている。これに対し提案手法では、図16で示すように光軸の再セット後でも精度のよい到達面が得られており、ノイズの影響を軽減した調整が行えている。したがって、探索履歴の評価値から求めた加重平均値を評価値として用いることでノイズ環境下でも安定した精度のよい調整が可能になることが分かった。

6. 終わりに

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て効率的な光軸自動調整を行うことを提案した。4自由度の光軸調整実験の結果、探索効率が改善し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、調整システムがノイズ環境下にある場合でも、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実用的であることを実証した。

今後の課題として、まず大域探索と焼きなまし法を組み合わせた手法など他の最適化手法についても調整実験を行い提案手法の有効性を比較検討することである。次に、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。例えば、12箇所の調整箇所を持つフェムト秒パルスレーザ自動調整システム[9]への適用が考えられる。

本提案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が可能である。そのような問題において、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

本研究の一部は、「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] Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison Wesley (1989).
- [2] 村田信治, 野里博和, 古谷立美, 村川正宏: 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] Hughes, E. J.: Multi-objective Binary Search Optimisation, *Proceedings of Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimisation (EMO 2003)*, April 8-11, Faro, Portugal, pp. 102-117 (2003).
- [4] 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, Vol. 43, No. SIG10 (TOM7), pp. 183-198 (2002).
- [5] 西川よし一, 三宮信夫, 茨木俊秀: 最適化, 岩波書店, 第4章 (1982).
- [6] Fitzpatrick, J. Michael and Grefenstette, John J.: Genetic algorithms in noisy environments, *Machine Learning*, Vol. 3, No. 2/3, pp. 101-120 (1988).
- [7] Stagge, P.: Averaging Efficiently in the Presence of Noise, *Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN V)*, pp. 188-197 (1998).
- [8] Knowles, J., Thiele, L. and Zitzler, E.: A Tutorial on the Performance Assessment of Stochastic Multiobjective Optimizers, 214, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), ETH Zurich, Switzerland (2006). revised version.
- [9] 野里博和, 河西勇二, 村川正宏, 板谷太郎, 樋口哲也, 古谷立美: 遺伝的アルゴリズムを用いたフェムト秒パルスレーザの自動調整, 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. 87-94 (2002).

(2006年12月12日 受付)

(2007年9月25日 採録)

[問い合わせ先]

〒274-8510 千葉県船橋市三山2-2-1

東邦大学大学院 理学研究科 情報科学専攻

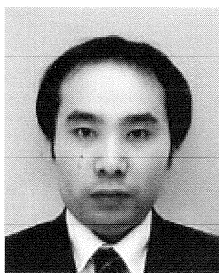
村田 信治

TEL: 047-472-8227

FAX: 047-474-6821

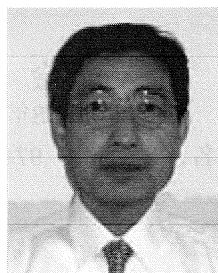
E-mail: 7505001m@nc.toho-u.ac.jp

著者紹介



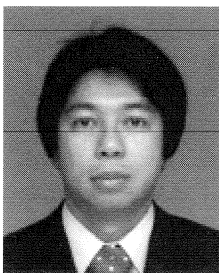
むらた のぶはる
村田 信治 [非会員]

1980年生。2005年東邦大学大学院理学研究科博士前期課程修了。現在、同研究科情報科学専攻博士後期課程在学中。遺伝的アルゴリズム、多目的最適化、進化型光学システムに関する研究に従事。平成19年電気学会「産学連携による論文」最優秀論文賞受賞。



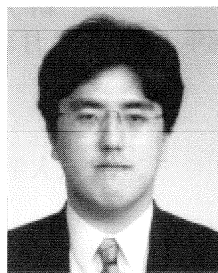
ふるや たつみ
古谷 立美 [非会員]

1947年生。昭和48年成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。知識処理マシンの研究開発に従事。平成6年より東邦大学教授。ネットワークと知識処理を組み合わせた応用研究に従事。工学博士。平成5年市村賞。



のさと ひろかず
野里 博和 [非会員]

1975年生。2003年東邦大学大学院理学研究科情報科学専攻博士課程修了。理学博士。同年日本学術振興会特別研究員(産業技術総合研究所学振特別研究員)。2006年産業技術総合研究所産総研特別研究員。現在に至る。遺伝的アルゴリズム、進化型光学システム、適応型光近接効果補正技術に関する研究に従事。平成19年電気学会「産学連携による論文」最優秀論文賞受賞。



むらかわ まさひろ
村川 正宏 [非会員]

1972年生。1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)入所。現在、情報技術研究部門主任研究員。東邦大学連携大学院准教授兼任。遺伝的アルゴリズム、進化型ハードウェア、強化学習の研究に従事。第2回進化システム国際会議最優秀論文賞、平成12年度つくば奨励賞、電気学会ミレニアム最優秀論文賞、平成19年電気学会「産学連携による論文」最優秀論文賞受賞。

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

by

Nobuharu MURATA, Hirokazu NOSATO, Tatsumi FURUYA and Masahiro MURAKAWA

Abstract :

In this paper, we propose a stochastic binary search algorithm utilizing weighted averaged evaluation value calculated from search history. By applying the proposed method to adjustment of the positioning and angle of the optical axes, we quantitatively verify that the proposed method can drastically reduce adjustment time and improve the precision of adjustment. Adjustment time can be reduced by the stochastic binary search algorithm and the precision of adjustment can be improved by adopting the weighted averaged evaluation value calculated from search history. Adjustment experiments with the proposed method demonstrate that the proposed method was able to reduce the adjustment time from 3 hours to 12 minutes and to adjust the positioning and angle of the optical axes robustly in noisy environments.

Keywords : optical axes, automatic adjustment, binary search, noisy environments, weighted average, multi-objective optimization

Contact Address : Nobuharu MURATA

Faculty of Science, Graduate School of Toho University
2-2-1, Miyama, Funabashi, Chiba, 274-8510, JAPAN
TEL : 047-472-8227
FAX : 047-474-6821
E-mail : 7505001m@nc.toho-u.ac.jp