

# 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

村田 信治<sup>†</sup> 野里 博和<sup>††</sup>  
古谷 立美<sup>†</sup> 村川 正宏<sup>††</sup>

レーザシステムの光軸の位置と角度の調整には一般的に  $\mu\text{m}$  精度が要求される。そのうえ、それらはトレードオフの関係が成り立っているため、従来のシステムでは同時調整が困難である。しかも、光軸の位置と角度を検出するために複雑なシステムが必要となるため、構築コストがかかってしまう。この問題を解決するために、光軸の位置と角度を同時検出する簡易光軸センサを新規開発した。このセンサ出力を遺伝的アルゴリズムの評価関数として用いる多目的自動調整手法を提案し、簡便な多目的光軸自動調整システムを実現した。実験の結果、従来は難しかった光軸の位置と角度（2目的）の同時自動調整を3時間で完了できた。

## An Automatic Multi-objective Adjustment System for Optical Axes with Genetic Algorithms Utilizing a New Optical Sensor

NOBUHARU MURATA,<sup>†</sup> HIROKAZU NOSATO,<sup>††</sup> TATSUMI FURUYA<sup>†</sup>  
and MASAHIRO MURAKAWA<sup>††</sup>

It is difficult for conventional systems to automatically adjust the optical axes of laser systems. The major problems are (1) that adjustment requires the high-precision positioning and angle settings with  $\mu\text{m}$  resolutions; (2) that adjustment must simultaneously satisfy multiple goals (both positioning and the angles of the optical axes) that have a trade-off relation; and (3) conventional detection systems, involving mirrors and sensors, are complicated and costly. In order to overcome these problems, we propose a multi-objective automatic adjustment method for optical axes that employs genetic algorithms and incorporates a new optical sensor. Experiments demonstrate that it is possible to realize simultaneous alignment for the positioning and the angles of the optical axes in three hours.

### 1. はじめに

現在、産業分野において欠かすことのできないレーザシステムはさまざまな用途に使用されている。一般的にこのレーザシステムでは、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。これによりレーザシステムの性能が低下しシステムの運用に支障をきたすため、そのたびに光軸を調整しなければならない。しかしながら、その調整は  $\mu\text{m}$  の位置精度や角度精度が要求さ

れるので非常に困難である。そのうえ、トレードオフの関係が成り立っている光軸の位置と角度（多目的）を同時に調整する必要がある。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、調整コストがかかるという問題点がある。そこで従来手法では、調整目的を多目的（位置と角度）から単目的（位置）へ変換することで自動調整を行っているが、多目的を同時に満たす調整はできていない。

さらに、光軸の位置と角度を調整するためには、それらを検出するデバイスが必要となる。しかしながら、現在の各種センサは光軸の位置と角度を同時検出することができない。そのため、それらの同時検出には複雑な検出システムが必要になり、構築コストがかかってしまうという問題点がある。

そこで本研究では（1）光軸の位置と角度を同時検出する簡易光軸センサを開発し（2）開発した簡易光軸センサの出力を遺伝的アルゴリズム（GA）<sup>1),2)</sup> の評

<sup>†</sup> 東邦大学大学院理学研究科情報科学専攻  
Department of Information Science, Faculty of Science,  
Graduate School of Toho University

<sup>††</sup> 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)

価関数として用いる多目的自動調整手法を提案する．提案手法による具体的な利点は以下の3点に要約される．

(1) 重みパラメータの設定が不要

複数の目的間におけるユーザの選好(好み)を反映させるための重みパラメータの設定が不要になる．

(2) 再調整が不要

ユーザの選好が変化した場合においても，すでに求めておいたパレート最適解集合の中から選好解を再選択すればよいので，効率的な調整が可能となる．

(3) 調整精度の向上

GAは候補を並列的に探索するので，局所解にとらわれず最適な調整が可能である．これにより，従来手法と比較して調整精度が向上する．

この提案手法を用いることで，簡便な多目的光軸自動調整システムを実現できる．

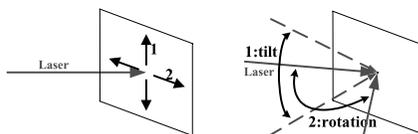
本論文では，まず2章で光軸を調整するためのシステムと従来の自動調整手法の問題点を説明する．3章では開発した簡易光軸センサについて説明し，4章で従来の自動調整手法の問題点を解決するための提案手法について述べる．5章では簡易光軸センサを用いた実験システムについて説明し，そのシステムによる自動調整実験の結果を述べる．6章で考察を述べ，7章では本研究のまとめと今後の課題について述べる．

## 2. 従来の自動調整手法とその問題点

本章では，まず光軸の調整システムについて説明したのち，従来の自動調整手法およびその問題点を述べる．

### 2.1 光軸の自動調整システム

レーザシステムの利用形態は，主に2種類に分類される．1つ目は，発生したレーザ光を他のレーザシステムに入射する，励起光源等の利用方法である．2つ目は，発生したレーザ光をそのまま加工等に使用するシステムである．これらシステムの光軸調整では，ともに位置と角度が重要である．その理由を次に述べる．まず初めに，他のレーザシステムに入射して使用するシステムについて説明する．この例として，レーザ光の出力を増幅するレーザキャビティをあげる．この例の場合，励起光源はレーザキャビティに安定してレーザ光を照射する必要がある．なぜなら，レーザキャビティへ照射されたレーザ光は，レーザキャビティ内でミラーやプリズムといった多数の光学ユニット間を往復することで出力が一定量まで増幅される．そのため，レーザキャビティの正確な位置へレーザ光が照射されたとしても，平行に入射されないと光学ユニット



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

図1 光軸の自由度

Fig. 1 Degree of freedom (D.O.F) for optical axes.

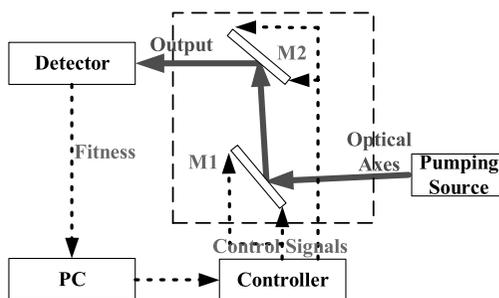


図2 4カ所調整可能な光軸自動調整システム

Fig. 2 An automatic adjustment system for optical axes with four D.O.F.

間の往復時にずれが生じてしまい，増幅されないからである．

次に，レーザ光をそのまま使用するシステムについて，レーザ加工を例にあげ説明する．レーザ加工では加工精度と加工面精度が重要となる．加工精度とは，加工後の寸法の精度であり，光軸の位置精度に影響される．加工面精度とは，レーザ加工された加工面の粗さであり，光軸の平行性に影響される．このため，加工精度が良く精巧に加工できたとしても，光軸が平行でないと加工面精度が悪くなり加工面が粗くなってしまふ．これらの理由により，レーザシステムでは光軸の位置と角度の2目的を調整して，レーザ光を目的の位置へ，平行に照射しなければならない．

光軸を調整する際の光軸の自由度を図1に示す．まず，光軸の位置の自由度では図1(a)のように縦方向の移動と横方向の移動の2自由度がある．また，光軸の角度においても，図1(b)のように縦方向の入射角と横方向の入射角の2自由度がある．よって，光軸の自由度は計4自由度である．このことから，光軸の調整ではこの4自由度に対応した調整箇所が必要となるので，調整箇所は少なくとも4カ所となる．

以上のことから，光軸の一般的な調整システムとして，図2に示すようなシステムが考えられる．このシステムには，光軸の位置と角度を調整するための2カ所調整可能なミラー2枚(M1, M2)がある．それぞれのミラー2カ所ずつ計4カ所を調整し，ミラーを動かすことにより光軸の位置と角度を調整する．つま

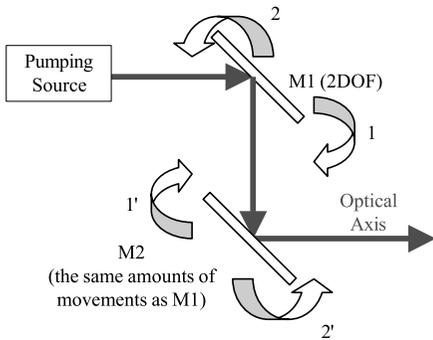


図 3 従来の光軸自動調整システム

Fig. 3 A conventional automatic adjustment system for optical axes.

り、この調整は設計変数が 4、目的関数は 2 の最適化問題と定義できる。

2.2 従来の自動調整手法とその問題点

このシステムを用いた従来の自動調整では、あらかじめ光軸を平行光と仮定して、位置だけを調整する単目的自動調整手法が一般的である。この理由として次の 2 つがあげられる。1 つ目は、調整箇所が 4 力所になると従来手法である山登り法では局所解に陥りやすいため、最適な調整が難しくなるためである。2 つ目は、ユーザの嗜好を反映して 2 つの目的関数（位置と角度）のトレードオフを満足させるために、多目的から単目的の変換（重みパラメータの設定等）に試行錯誤がともなうためである。その結果、従来手法では一般的に調整箇所を 4 力所から 2 力所に減らすことで、調整目的を位置だけに絞った調整を行っている。

従来の自動調整手法の例を図 3 を用いて説明する。この方法では、光軸は平行であると仮定している。光軸の位置のずれを補正するためにミラー M1 を動かす。ミラー M2 は光軸の平行性を失わないように M1 の動きに連動して移動させる。このような構造により、M1 の 2 力所の調整を行うことで光軸の位置のずれを補正し、平行なレーザー光を供給することが可能である。しかしながら、光軸が大きくずれて、M1 へ入射される光軸が平行性を失った状態では、平行性を調整することができないので平行光を供給することが不可能となる。

3. 開発した簡易光軸センサ

本章では、新たに開発した簡易光軸センサについて説明する。まず、従来の光軸の位置と角度の同時検出方法について述べ、次に開発した簡易光軸センサについて説明する。最後に開発したセンサの有効性を確認する。

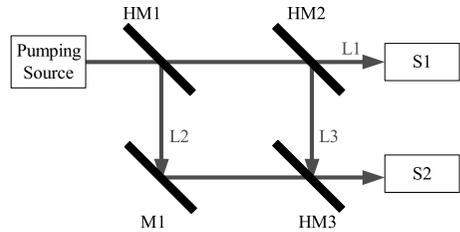


図 4 従来の光軸の位置・角度検出システム

Fig. 4 A conventional detection system for parallelism of optical axes.

3.1 従来の光軸の位置および角度の同時検出システム

光軸の位置と角度を調整するには、光軸の位置と角度を同時に検出する必要がある。しかし、現在の各種センサでは光軸の位置と角度を同時に検出することは難しい。そのため、従来では光軸の位置と角度を検出するためにハーフミラー（HM1, HM2, HM3）、ミラー（M1）、位置センサ（S1, S2）で構成される図 4 に示すようなシステムを用いている。

ハーフミラーは入射光を反射光と透過光に 2 分割する。光源からのレーザー光 L1 を位置センサ S1 で評価することで光軸の位置を検出し、ハーフミラー HM1 と HM2 で分割したレーザー光 L2 と L3 の位置ずれを位置センサ S2 で評価することで、光軸が平行光であるかないかを検出する。しかしながらこの検出方法では、センサやミラー等が複数必要となり、調整システムが複雑になるうえに、構築コストがかかり簡便ではない。

3.2 開発した位置・角度検出センサ

そこで本研究では、これら位置と角度の 2 つを同時に 1 つのセンサで検出可能な新たな簡易光軸センサを開発した。このセンサは図 5 で示すように、光軸の位置と光強度が検出可能な PSD（Position Sensitive Detector: 位置検出素子）の前に穴の開いた透過率 50% の ND フィルタを配置することで、光軸の位置と角度の同時検出を可能とする。

PSD は、受光面上での光軸の位置の  $X, Y$  座標を電圧値  $V_X, V_Y$  で、受光面上での光強度を電圧値  $V_I$  として出力する。この出力される  $V_I$  を評価することで光軸の角度を検出する。このとき  $V_I$  は最小値を 0、最大値を 1 として規格化した値を用いる。光軸が平行な場合、フィルタの穴を通過するため検出される  $V_I$  は 1 に近づく。一方光軸が平行でない場合、光軸がフィルタを通過するため検出される  $V_I$  は 1 よりも小さくなる。

この開発した簡易光軸センサを用いて、光軸の角度

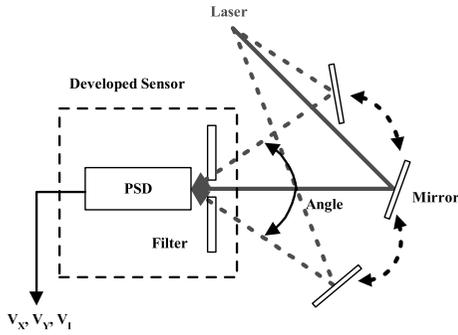


図 5 開発した位置・角度検出センサの構造

Fig. 5 A developed detection sensor for positioning and angles of optical axes.

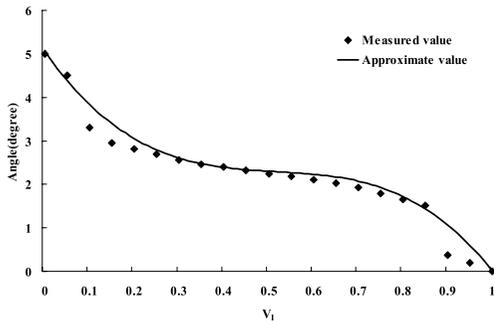


図 6 光軸検出センサによる光軸の角度検出

Fig. 6 Detection for the angle of optical axes by the developed sensor.

と  $V_t$  の関係を調べる予備実験を行った。その結果を図 6 に示す。この図における点は実測値で、実線は得られた実測値から求めた近似曲線となっている。その近似曲線は次式で表される。

$$\text{Angle} = -17.82V_t^3 + 27.66V_t^2 - 014.91V_t - 5.07 \quad (1)$$

簡易光軸センサで検出した  $V_t$  を式 (1) を用いて評価することで光軸の角度を求めることが可能である。このようにして PSD からの出力  $V_x$ ,  $V_y$  で光軸の位置を検出でき、 $V_t$  を評価することで光軸の角度を検出することが可能となる。

#### 4. 遺伝的アルゴリズムを用いた光軸の多目的自動調整

光軸の位置だけでなく角度も調整するために、遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化手法を用いることを提案する。以下では、まず一般的な多目的最適化手法の概念を説明し、次に GA を用いた多目的自動調整手法を述べる。最後に、提案手法による調整のフローチャートについて説明する。

##### 4.1 多目的最適化手法の概念

多目的最適化手法とは「パレート最適解」の集合を

求める手法である<sup>3)</sup>。パレート最適解とは複数の目的関数の中で、1つの目的関数を良くしようとすると他の目的関数が悪くなる解と定義されている。一般にこのパレート最適解は複数個存在するため、計算されたパレート最適解の中からユーザの選好(好み)により選択された選好解が最終的な最適解となる。

そこで本研究では、この多目的最適化手法を光軸の調整に用いる。この場合の利点は2つある。1つ目は、ユーザの選好が変化した場合、すでに求めたパレート最適解集合から選好解を選択すればよいので再調整が不要になり、効率の良い調整が可能となる。2つ目は、ユーザの選好を反映させるための重みパラメータの設定が不要なことである。

ただし、 $\epsilon$  制約法<sup>3)</sup>等の、一般的な多目的最適化手法では膨大な繰返し計算が必要となるため、調整手法に適用した場合は、調整時間が大幅に増大し実用的ではない。そこで本研究では、多目的最適化手法として GA を用いる。

##### 4.2 遺伝的アルゴリズムを用いた多目的自動調整手法

GA は確率的探索手法の1つであり、複数の解候補を並列的に探索するアルゴリズムである。解候補である個体(染色体)の集団を考え、その集団に生物の進化の仕組みを模倣した操作を行うことにより、より良い解を得ようとする。この手法を多目的最適化に適用すると、解候補の集団が最終的にパレート最適解集合となることが期待されるので計算量が減少し、局所解にとらわれず最適化が行えるという利点が生じる<sup>2)</sup>。

そこで、本研究で提案する自動調整手法のフローチャートを図 7 に示す。本研究では多様性と精度のバランスのとれたパレート最適解集合が得られる NCGA<sup>4)</sup> (Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm: 近傍培養型遺伝的アルゴリズム)を用いる。以下に、具体的な調整の流れを説明する。

##### (1) 染色体のコード化

図 8 に示すように、染色体は 2 カ所調整可能なミラー 2 枚を動かす合計 4 つのステップモータの初期位置からの移動量  $x_1, x_2, x_3, x_4$  に対応している。1 つのステップモータの値は、8 ビットの整数 (-128 ~ 127) を 2 進数で表現するので、染色体長は 32 ビットとなる。

##### (2) 選択

選択においては、アーカイブ個体群  $A_t$  をコピーした個体群  $P_t$  を、後述する適応度  $f_1$  または  $f_2$  を基準に並べ替える。このとき、繰り返し同じ 2 個体が選択されるのを避けるため、次の 2 つの操作を行う。1 つ

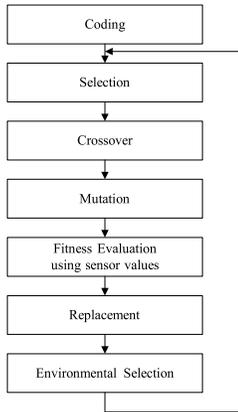


図 7 多目的遺伝的アルゴリズムによる調整フローチャート  
Fig.7 Flowchart for alignment based on MOGAs.

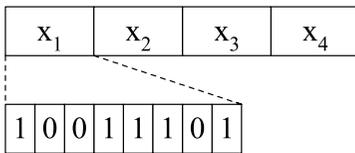


図 8 染色体のコード化  
Fig.8 Coding to a chromosome.

目は、ソート時に基準とする適応度を世代ごとに変更する。2 つ目は、ソート後に個体群  $P_t$  に対して  $N$  個の幅の近傍個体をランダムに並べ替える。この集団から  $i$  番目と  $i-1$  番目の隣り合った 2 個体を選択し、これら 2 個体に対して遺伝的操作を行う。なお初期集団は、 $N_p$  個の染色体をランダムに生成する。具体的には、染色体それぞれの各ビットにおいて 0 または 1 を一様乱数により発生させる、

(3) 交叉

交叉は、選択された 2 個体 A, B から新たな 2 個体 A', B' を作る。本研究では、一般的な一点交叉方法を用いる。つまり、染色体中にランダムな交叉位置を設定し、その部分で A と B の染色体を入れ替えて A', B' を作る。なお、交叉は必ず発生する。

(4) 突然変異

突然変異は、交叉後の各染色体に発生し、染色体の一部を書き換える。本研究では、各遺伝子のビットを反転する。なお、突然変異の発生確率は  $P_m$  とする。

(5) 適応度評価

次に、上記遺伝的操作によって発生した 2 個体の適応度評価を行う。本手法では、染色体が表すステップモータの値によりミラーを動かした後、センサ出力  $V_X, V_Y, V_I$  を取り込み、次式 (2), (3) を用いて適応度を計算する。

$$f_1 = \sqrt{(V_X - V_{X_0})^2 + (V_Y - V_{Y_0})^2} \quad (2)$$

$$f_2 = -17.82V_I^3 + 27.66V_I^2 - 14.91V_I - 5.07 \quad (3)$$

$f_1$  は光軸の位置に関する適応度である。 $V_{X_0}, V_{Y_0}$  は、それぞれ光軸の目標位置の X, Y 座標を表し、 $f_1$  は目標位置とのユークリッド距離となる。 $f_1$  が小さいほど目標位置との誤差が小さくなり、光軸の位置が調整されていることを意味する。 $f_2$  は光軸の角度に関する適応度であり、3.2 節で説明した式 (1) をもとに算出する。 $V_I$  は光強度を表し、 $V_I$  の値が大きいくほど  $f_2$  の値は小さくなり、光軸の角度誤差が  $0^\circ$  (平行) に近づいていることを意味する。

(6) 置換

新たな 2 個体 A', B' の適応度評価が完了した後、置換の操作が行われる。その方法は、この 2 個体を  $P_t$  と入れ替える。そして、変数  $i$  に 2 を加え、 $i$  が個体数  $N_p$  と等価になるまで選択、交叉、突然変異、適応度評価を繰り返す。更新された個体群を  $P_{t+1}$  とする。

(7) 環境選択

環境選択は、 $A_t$  と  $P_{t+1}$  の和集合に対し、SPEA2<sup>5)</sup> における適合度割当てを行い、適合度と端切り法を用いて和集合の中から  $N_p$  個の個体を選択し、新たな個体群  $A_{t+1}$  を生成する。そして、環境選択後、再び (2) の選択操作に戻り、遺伝的操作を繰り返す。なお、遺伝的操作は環境選択を  $G_{nega}$  回繰り返した時点で打ち切る。

5. 光軸自動調整実験

本章では、提案手法を用いた光軸自動調整実験について述べる。まず、提案手法を実現するための光軸自動調整システムの概要を説明する。次に、この光軸自動調整システムを用いた光軸自動調整実験の実験内容について説明し、実験結果について述べる。

5.1 実験システム

開発した実験システムを図 9 に示す。このシステムの構成要素は以下のとおりである。

(1) 制御装置

ミラーを制御する制御装置は (株) 進化システム総合研究所のステップモータドライバ ERI-MSDRV001 および、ミラーホルダシステム AlignmentPro を用いた。図 10 に実験で使用したミラーホルダシステムを示す。これには 2 つのステップモータが取り付けられており、これらのステップモータを制御することでミラーをあおり方向、ふれ方向に動かす。このシステムでは  $0.075 \mu\text{m}/\text{Step}$  の分解能でミラーを制

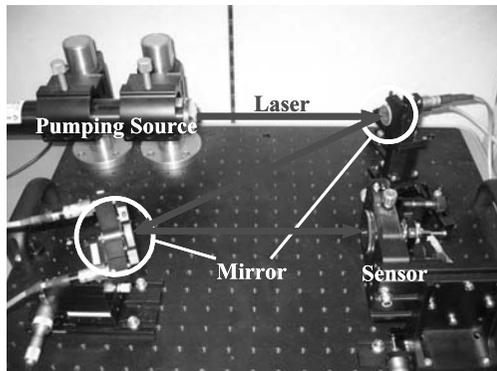


図 9 開発した光軸自動調整システム

Fig. 9 The developed automatic adjustment system for optical axes.

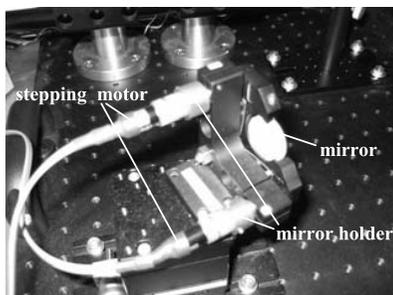


図 10 ミラーホルダシステム

Fig. 10 The mirror holder system.

御することが可能である。

## (2) 評価装置

評価装置には、3章で説明した簡易光軸センサおよび、浜松ホトニクス社の2次元PSD信号処理回路C9069を用いた。このC9069では、光強度はセンサの電圧値(最大36V)を12ビット分割した値として出力される。また、センサ上での光軸の位置は、PSDの幅または高さLを12ビット分割した値として出力される。なお、 $L = 5.7\text{ mm}$ 、12ビットは0~4065なので、センサの出力値の位置分解能は $1.39\ \mu\text{m}$ となる。

## (3) 光源

光源には、JDS Uniphase社のHe-Ne Laser(1125P)を用いた。この光源から評価装置までの光路長は800mm、ビーム径は2mmである。

## (4) PC

使用した計算機のスペックはCPU:700MHz、メモリ:128MBである。このPC上で図7で説明したフローチャートが実行される。

## 5.2 実験内容

光軸の調整目標を、光軸の位置がセンサの受光面の中心、かつ光軸が平行とする。予備実験として、光軸

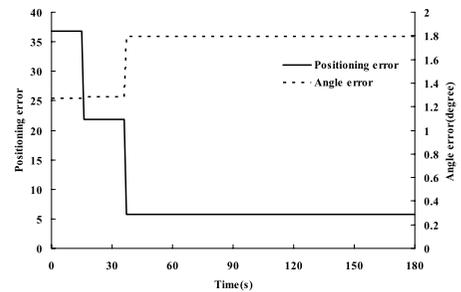


図 11  $f_1$  を目的とする調整の最良個体の推移

Fig. 11 The best individual for objective function  $f_1$ .

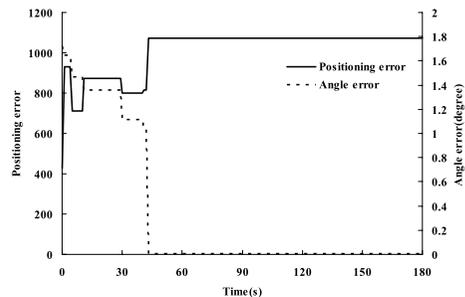


図 12  $f_2$  を目的とする調整の最良個体の推移

Fig. 12 The best individual for objective function  $f_2$ .

の位置と平行性がトレードオフの関係にあるかどうか検証する。具体的には、適応度  $f_1$  (光軸の位置) を目的とした単目的自動調整実験と、適応度  $f_2$  (光軸の角度) を目的とした単目的自動調整実験を行う。単目的調整では、調整手法としてGAのMGGモデル<sup>(6),7)</sup>を用いた。

本実験では、光軸の位置と角度の2目的自動調整が可能かどうか検証するために、4章で説明した提案手法を用いて多目的自動調整実験を行う。

## 5.3 単目的光軸自動調整実験結果

予備実験で用いたパラメータは次のとおりである。個体数  $N_p = 20$ 、交叉の発生確率  $P_c = 1.0$ 、突然変異の発生確率  $P_m = 0.05$  とし、調整時間は初期個体生成から調整終了までの時間を3時間(遺伝的操作の繰返し回数は約1,260回)とした。光軸の初期位置は理想的な状態(目標位置との誤差が0、かつ角度が $0^\circ$ )から、光軸の位置を $\pm 5\text{ mm}$ の範囲で、光軸の角度を $\pm 4^\circ$ の範囲でランダムにずらした場所とする。この状態から自動調整を開始する。実験は5試行行った。

$f_1$  (光軸の位置) を目的とする単目的自動調整実験と  $f_2$  (光軸の角度) を目的とする単目的自動調整実験において、それぞれのある1試行における最良個体の推移を図11、図12に示す。また、5試行の調整結果を表1に示す。この表では、それぞれの単目的調整

表 1 各単目的調整の結果

Table 1 Results for the final generation on each single objective adjustment.

| 単目的調整          | 適応度   | 平均値   | 最大値    | 最小値   |
|----------------|-------|-------|--------|-------|
| $f_1$ を目的とする調整 | $f_1$ | 9.3   | 17.1   | 3.5   |
|                | $f_2$ | 1.3   | 1.8    | 0.8   |
| $f_2$ を目的とする調整 | $f_1$ | 554.3 | 1072.7 | 149.8 |
|                | $f_2$ | 0.1   | 0.1    | 0.0   |

における最良個体の 2 つの適応度 ( $f_1, f_2$ ) の全 5 試行中の平均値, 最大値, 最小値を示している。

図 11 および表 1 の  $f_1$  (光軸の位置) を目的とする調整の結果から, 位置誤差を最小にする調整が進むと, それにともない角度が大きくなっていることが分かる。具体的には, 調整目的である適応度  $f_1$  の最小値は 3.5 ( $3.5 \times 1.39 = 4.87 \mu\text{m}$ ), 最大値でも 17.1 ( $17.1 \times 1.39 = 23.77 \mu\text{m}$ ) となったが, 目的でない適応度  $f_2$  は最大で  $1.8^\circ$  もずれてしまっている。つまり,  $f_1$  (光軸の位置) を目的とする単目的調整では, 角度の調整をすることができないことを確認した。

一方, 図 12 および表 1 の  $f_2$  (光軸の角度) を目的とする調整結果からは, 角度を最小にする調整が進むと位置誤差が大きくなっていることが分かる。具体的には, 調整目的である適応度  $f_2$  の最小値は  $0.0^\circ$ , 最大でも  $0.1^\circ$  となり, 角度を  $0^\circ$  に近い調整を達成しているが, 目的ではない適応度  $f_1$  は最小値でも 149.8 にしかならず, 位置誤差の調整がされていないことを確認した。

以上の結果により, 単目的調整では目的とした適応度しか調整されていない。さらに, 位置誤差を最小にすると角度が大きくなり, 逆に角度を最小にすると位置誤差は大きくなる。このことから, 光軸の位置と角度はトレードオフの関係が成り立っているということが確認でき, 光軸の調整には多目的最適化手法が必要であることを確認した。

5.4 多目的光軸自動調整実験結果

次に, 多目的自動調整実験について述べる。実験条件は次のとおりである。個体数  $N_p = 20$ , 突然変異の発生確率  $P_m = 0.05$  とし, 調整時間は初期個体生成から調整終了までの時間を 3 時間 (遺伝的操作の繰返し回数は  $G_{ncga} =$  約 240 回) とした。光軸の初期位置は理想的な状態から, 光軸の位置を  $\pm 5 \text{ mm}$  の範囲で, 光軸の角度を  $\pm 4^\circ$  の範囲でランダムにずらした場所とし, 自動調整を開始する。実験は 5 試行行った。

全 5 試行中のある試行での初期個体群と最終世代の個体群の結果を図 13 に, 最終世代のパレート最適個体の部分を拡大したものを図 14 に示す。図 13 に

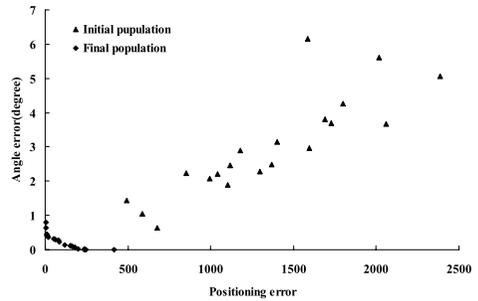


図 13 初期個体群と最終世代の個体群  
Fig. 13 Initial and final population.

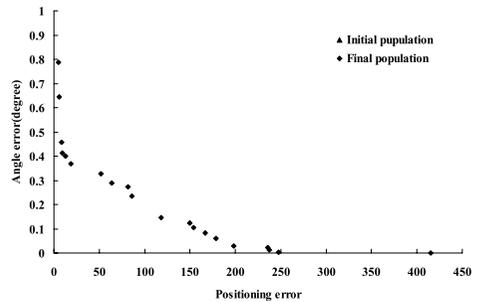


図 14 図 13 の優良個体群の拡大図  
Fig. 14 Magnification of Fig. 13.

において適当に分布していた初期個体群が, 最終世代では理想的な状態にほぼ収束していることが分かる。また, 拡大図である図 14 から多数の個体がパレート最適解であることが分かる。このことから, 提案手法による多目的光軸自動調整を用いることでパレート最適解を得ることが可能であることを確認できた。

6. 考 察

本章では, 提案手法をレーザ加工システムの光軸調整に適用した場合を例にとり, 選好決定までの流れを説明し, 提案手法の有用性を考察する。提案手法をレーザ加工に適用した場合, 加工に必要な位置精度と角度精度を満たしたパレート最適解が得られる。しかし, 光軸調整におけるユーザの選好対象は加工精度と加工面精度であり, 設計目標とユーザの選好は同一ではない。なぜなら, 加工精度と加工面精度を得るには設計目標を達成した状態の光軸を使用し, 実際に加工物を加工する必要がある。つまり, 加工後にはじめてユーザの選好を満足しているか判断が可能となる。これらの関係を図 15 に示す。加えて, これらの加工精度と加工面精度は, 光軸の位置精度と角度精度が一定でも加工物や加工に使用する機材等の環境によって変化する。つまり, 加工時の環境による影響を受けるため, 加工精度と加工面精度 (ユーザの選好) から光軸

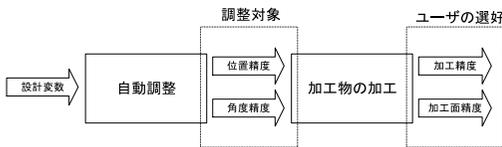


図 15 選好解決定までの流れ

Fig. 15 Flowchart for selection of the preferred solution.

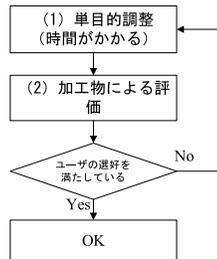


図 16 単目的調整の流れ

Fig. 16 Flowchart for single-objective adjustment.

の位置精度と角度精度（設計目標）を正確に決定することはとても困難である。

この調整に従来の単目的最適化手法を用いた場合、図 16 で示すように（1）単目的調整（2）加工物による評価という流れになる。調整後（2）における結果がユーザーの選好を満たしていないければ目標値を変え再度（1）（2）を行わなければならない。このように、厳密な設計目標が存在しない単目的調整では、ユーザーの選好を満たした結果が得られるまで（1）（2）を繰り返すため、調整を始めから何度も行う必要がある。そのため、光軸調整に熟練した技術者とそうでない人では調整に要する時間に差がでてしまう。

これに対し、提案手法である多目的調整は図 17 のように（1）多目的調整（2）パレート最適解の中から選好解を選択（3）光軸を選択した解の状態にセット、（4）加工物による評価となる。まず（1）で加工に必要な最低限の位置精度と角度精度を満たしたパレート最適解を求める。次に（2）（3）（4）を行い、ユーザーの選好を満足しているか確認する。もし満足していない場合（2）（3）（4）を繰り返し、ユーザーが求めたパレート最適解を評価する。つまり、あらかじめパレート最適解を求めておくことにより何回か選好解の状態に光軸をセットし直すことでユーザーの選好に合う調整を行うことが可能となる。さらに、環境の変化にともないユーザーの選好（加工精度と加工面精度）が変化した場合にも同様に対応することができ、効率的に再調整を行える。

以上のように、厳密な設計目標が存在しない光軸の調整問題において、単目的調整では試行錯誤がとま

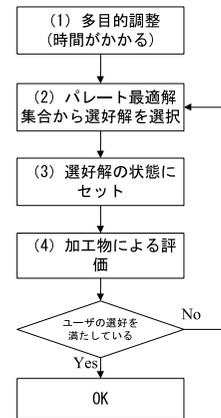


図 17 提案する多目的調整の流れ

Fig. 17 Flowchart for proposed multi-objective adjustment.

り何度も調整を繰り返す必要がある。これに対し、多目的調整では選好解の状態に光軸をセットするだけでユーザーの選好を満たした調整を行うことができるため、調整に試行錯誤をとまわらない。この結果、光軸調整に熟練していないユーザでもユーザーの選好を満たす最終的な解を求めることが可能となる。

## 7. おわりに

本研究では、光軸の位置と角度を同時検出可能な簡易光軸センサを開発し、その出力を GA の評価関数として用いる多目的光軸自動調整手法を提案した。提案手法を実現する多目的光軸自動調整システムを用いた実験の結果、まず光軸の位置と角度はトレードオフの関係にあることが確認でき、光軸の調整に多目的最適化手法が必要であることを実証した。次に、提案手法により光軸の位置と角度の同時調整を 3 時間で完了することができ、提案手法の有効性を確認した。これにより、簡便な多目的光軸自動調整システムを実現できた。

今後の課題としては、探索効率を上げ、調整時間の短縮を図ることで、より実用的な調整手法に改良することがある。そのためには次の 2 つが課題となる。1 つ目は、遺伝的アルゴリズムの諸パラメータや交叉等の遺伝的操作の最適化を行うことである。2 つ目は NCGA 以外の多目的遺伝的アルゴリズムを用いた光軸調整との比較実験等を行い、光軸の自動調整に適した多目的遺伝的アルゴリズムの手法を検討することである。

なお、本提案システムをレーザー自動調整システム<sup>8)</sup>を用いたレーザーキャビティと組み合わせることにより、光源とキャビティのトータル調整システムを実現する

ことが可能である。これは、レーザシステムは励起光源とレーザキャビティで構成されるが、現在それぞれ個別に調整が行われている。そのため、個々のシステムにおいて最適調整されたとしてもトータルシステムの性能は必ずしも最適といえない。そこで、両者を組み合わせたトータルシステムで同時に調整を行うことで、個別調整よりも安定した、高性能なレーザシステム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) Goldberg, D.E.: *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley (1989).
- 2) 北野宏明 (編): 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書 (1995).
- 3) 西川よしー, 三宮信夫, 茨木俊秀: 最適化, 第 4 章, 岩波書店 (1982).
- 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: 数理モデル化と応用, Vol.43, No.SIG10(TOM7), pp.183-198 (2002).
- 5) Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L.: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, TIK-Report103 (2001).
- 6) Satoh, H., Yamamura, M. and Kobayashi, S.: Minimal Generation Gap Model for GAs Considering Both Exploration and Exploitation, *International Conference on Soft Computing*, pp.494-497 (1997).
- 7) 佐藤 浩, 小野 功, 小林重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp.734-744 (1997).
- 8) 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ーの自動調整, 情報処理学会論文誌, 数理モデル化と応用, Vol.43, No.SIG10(TOM7), pp.87-94 (2002).

(平成 17 年 8 月 23 日受付)

(平成 17 年 10 月 23 日再受付)

(平成 18 年 2 月 14 日再々受付)

(平成 18 年 3 月 12 日採録)



村田 信治

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, 多目的最適化に関する研究に従事。



野里 博和

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。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。



古谷 立美 (正会員)

東邦大学教授。工学博士。1973 年成蹊大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。1994 年より現職。知識処理, ネットワーク応用等に興味を持つ。



村川 正宏

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(産業技術総合研究所)入所。東邦大学連携大学院助教授兼任。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。電気学会会員。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受賞。