

# 波面を補正するハイブリッドシステムへの遺伝的アルゴリズムの適用

柳沢 忠司\*・高木 康博\*\*

\*日本大学理工学部物理学科 〒101 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

\*\*日本大学文理学部応用物理学科 〒156 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

## Wavefront Correction by a Hybrid System Using the Genetic Algorithm

Tadashi YANAGISAWA\* and Yasuhiro TAKAKI\*\*

\*Department of Physics, College of Science and Technology, Nihon University, 1-8-14, Kandasurugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101

\*\*Department of Applied Physics, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156

The genetic algorithm is applied to control a hybrid system which corrects wavefront degradation. The system measures the intensity distribution on the image plane and controls the phase modulation on the lens plane. When the dynamic range of the intensity measurement is limited, the genetic algorithm enables the system to deal with more resolvable points than does the simulated annealing algorithm which was used in our previous system. We experimentally demonstrated correction of wavefronts degraded by defocusing or insertion of phase objects. The number of resolvable points of  $32 \times 32$  was achieved with the dynamic range of 128 gray levels.

### 1. はじめに

近年, deformable mirror<sup>1,2)</sup> や位相変調液晶素子<sup>3-7)</sup> を用いて劣化した波面を補正する補償光学に関する研究が盛んに進められている。これらの多くは波面センサーを用いて波面を直接測定し、その測定結果をもとに波面の補正を行う。筆者らは、波面センサーを必要とせず、像面での光強度分布の測定をもとに位相変調液晶素子で波面補正を行うハイブリッドシステムを提案し研究を進めてきた<sup>8,9)</sup>。このシステムは像面での光強度分布から補正位相分布を推定するため、波面センサーを用いる場合に比べて像の補正がより直接的に行うことができる。さらに、位相変調素子を含めた光学系の特性の学習・補正が可能である。

波面センサーを用いる場合は、劣化した波面を補正する位相分布を直接求めることができる。しかし、本研究では像面で測定した光強度分布から、補正位相分布を間接的に求める必要がある。筆者らは、以前の研究で補正

位相分布を求める手法としてシミュレーティド・アニーリング<sup>10,11)</sup> を用いた。シミュレーティド・アニーリングは代表的な最適化アルゴリズムのひとつでグローバルミニマムな解を与えることが知られているので、ハイブリッドシステムの基本的な動作を確認するのに妥当であると考えた。しかし、像面の光強度分布を測定する光検出器に大きなダイナミックレンジを必要とすることが問題点として判明した。

そこで、本研究ではハイブリッドシステムの制御アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム<sup>12,13)</sup> を適用し、光検出器に必要とされるダイナミックレンジを低減することを試みた。遺伝的アルゴリズムは、光情報処理の分野では光相関器の参照パターンの最適化<sup>14)</sup> やキノフォームの最適化<sup>15)</sup> などにすでに応用されている。遺伝的アルゴリズムは必ずしもグローバルミニマムな解を与えないが、シミュレーティド・アニーリングに比べて少ない繰り返し数で収束することが知られている。

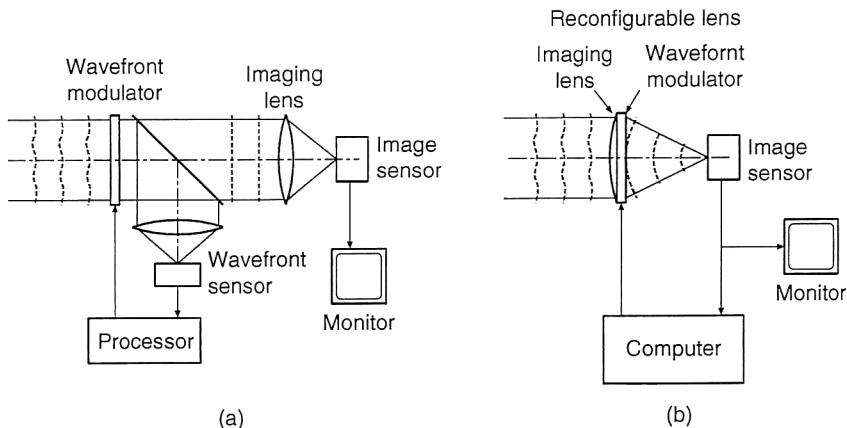


Fig. 1. Two types of wavefront correction. (a) Correction using a wavefront sensor, (b) correction based on the intensity measurement on the image plane.

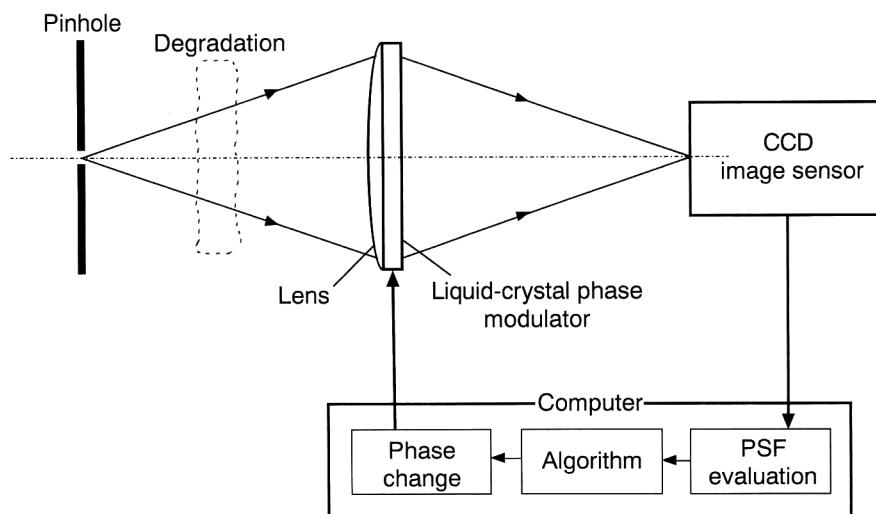


Fig. 2. Hybrid system which corrects degraded wavefront by use of a liquid-crystal phase modulator.

## 2. 原 理

### 2.1 ハイブリッドシステム

最初に、筆者らが研究を行ってきた波面の補正を行うハイブリッドシステムについて説明する。

波面センサーを用いた従来の波面補正システムを Fig. 1(a) に示す。波面センサーで波面を測定し、位相変調液晶素子等の波面制御デバイスで波面の補正を行う。つぎに、筆者らが提案し研究を進めてきたハイブリッドシステムを Fig. 1(b) に示す。像面での光強度分布の測定をもとに波面制御デバイスを制御することで、波面の補正を行う。

本研究で用いるハイブリッドシステムの動作原理を Fig. 2 に示す。レンズの瞳面に波面制御デバイスとして

位相変調液晶素子を配置し、イメージセンサーとして CCD 撮像素子を用いる。物体面に配置した点光源から発せられた波面が位相物体等により擾乱され劣化する。この劣化した波面が像面で形成する光強度分布、すなわち点像応答関数をイメージセンサーでとらえる。この点像応答関数がデルタ関数に近づくように位相変調素子に表示する位相分布を決定する。すなわち、劣化した波面の補正位相分布を求める。

### 2.2 最適化アルゴリズム

点像応答関数をデルタ関数に近づけるために、点像応答関数のデルタ関数に対する二乗誤差を計算し、評価関数として用いる。位相分布を変化させ評価関数を求める処理を繰り返し行い、評価関数の値が最小になる位相分

布を求める。このように、波面の補正を行うハイブリッドシステムでは、評価関数の値を最小にする最適解を求めるために最適化アルゴリズムを用いる。

筆者らが以前に行った研究では、最適化アルゴリズムとして広く用いられているグローバルミニマムな解を与えることが知られているシミュレーティド・アニーリングを用いた<sup>9)</sup>。位相分布の一点をランダムに選び、その位相値をランダムに変化させる。評価関数の値が小さくなかった場合は、その位相変化を受け入れる。評価関数の値が大きくなかった場合は、その位相変化を基本的には受け入れないが、ある程度の確率で受け入れを行いローカルミニマムな解に収束することを回避する。以上のような位相分布の変化と評価を繰り返し行い、最適化の進行とともに確率的な受け入れの割合を減じることで、グローバルミニマムな最適解に収束させる。シミュレーティド・アニーリングでは、位相分布を一点ずつ変化させため、位相分布の点数が増加すると、点像応答関数の変化の割合が小さくなり光検出器に大きなダイナミックレンジが必要になることが問題点であった。

光検出器に必要とされるダイナミックレンジを減少させる方法としては、位相分布の複数の点を同時に変化させないようにアルゴリズムを変更することが容易に考えつく。しかし、このように複数の変数の値を同時に変化させる最適化アルゴリズムとしては、遺伝的アルゴリズムがすでに確立されている。そこで、本研究ではハイブリッドシステムへの遺伝的アルゴリズムの適用を行う。遺伝的アルゴリズムを用いることで、光検出器のダイナミックレンジが限られている場合でも、より多くの解像点数を扱うことを可能にする。また、遺伝的アルゴリズムはシミュレーティド・アニーリングと比較して少ない繰り返し数で最適化が行えることが知られている。

### 2.3 遺伝的アルゴリズムの適用

遺伝的アルゴリズムは、生物の遺伝子の進化をモデルにした最適化アルゴリズムである。遺伝的アルゴリズムをFig. 3に示す。ハイブリッドシステムに適用する場合は、レンズの瞳面での位相分布を遺伝子の集まりである個体に見立てる。最初に、いくつかの個体すなわち位相分布を乱数で発生させる。これらの位相分布を補正位相分布として位相変調素子に表示して、光学系の点像応答関数の光強度分布を測定し、評価関数を計算することでそれぞれの個体の適応度を求める。適応度に応じて、個体の選択・淘汰を行う。次に、選択された個体間で交差を行う。すなわち、位相分布の一部を入れ換える。次に、個体の遺伝子を突然変異させる。すなわち、位相

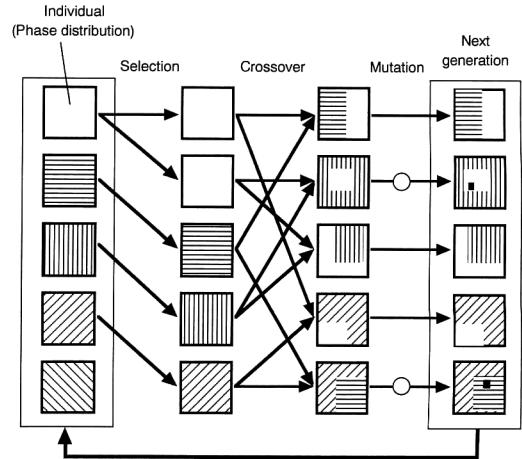


Fig. 3. Genetic algorithm for optimization of phase distribution.

分布の一部をランダムに変化させる。このようにして発生させた新しい個体群に対して同様の処理を繰り返し行うことで、適応度の低い個体は消滅し適応度の高い個体が生成されてゆく。すなわち、位相分布の最適化が行われる。ただし、遺伝子という言葉からは1次元的なデータ列が連想されるが、位相分布の最適化では2次元構造をもつ個体を用いる。

### 3. 計算機シミュレーション

ハイブリッドシステムに遺伝的アルゴリズムを適用することの有用性を計算機シミュレーションを用いて調べた。

波面の劣化要因としては、焦点ずれを仮定した。解像点数を  $N \times N$  で表し、 $N=16$ ,  $N=32$  および  $N=64$  の場合についてシミュレーションを行った。位相分布の量子化数は、実験に用いる位相変調素子の量子化数と等しく 16 とした。すなわち、位相量  $2\pi$  を 16 分割する量子化を行った。光検出器のダイナミックレンジは、ハイブリッドシステムで測定する光強度が量子化されることから、階調数  $2^B$  を用いて表した。

遺伝的アルゴリズムの総個体数  $M$  は 50 とした。選択・淘汰の方法としては、個体を適応度の順に並べて、その順位に応じた選択確率を与えるランク戦略法を用いた。また、生成した次世代の個体群に、一世代前の個体群よりも高い適応度をもつ個体がなかった場合、一世代前の最も高い適応度をもつ個体を  $M+1$  番目の個体として次世代の個体群に加えるエリート保存戦略法を併用した。突然変異の割合は、 $N=16$  および  $N=32$  のとき

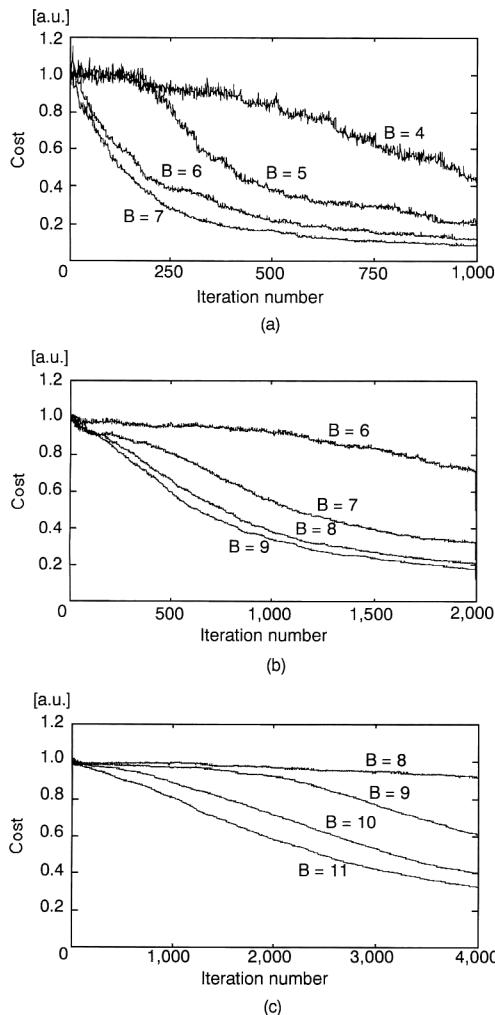


Fig. 4. Decrease of cost function to correct defocusing, obtained by computer simulation. Matrix size is (a)  $N=16$ , (b)  $N=32$ , and (c)  $N=64$ .

毎回 35 個体とし、 $N=64$  のとき毎回 45 個体とした。

計算機シミュレーションの結果を示す。Fig. 4(a), (b) および(c) に、それぞれ  $N=16$ ,  $N=32$  および  $N=64$  の場合の結果を示す。個体群の中の評価関数の最小値が繰り返し数とともに変化していく様子を示す。Fig. 5(a) に、最適化後に得られた最終的な評価関数の値と光検出器のダイナミックレンジの関係を示す。ただし、繰り返し数は  $N=16$ ,  $N=32$  および  $N=64$  の場合で、それぞれ 1,000 回, 2,000 回および 4,000 回である。比較のために、筆者らが以前に行ったシミュレーティド・アニーリングを用いた場合の計算機シミュレーションの結果を Fig. 5(b) に示す。ただし、この場合の繰り返し

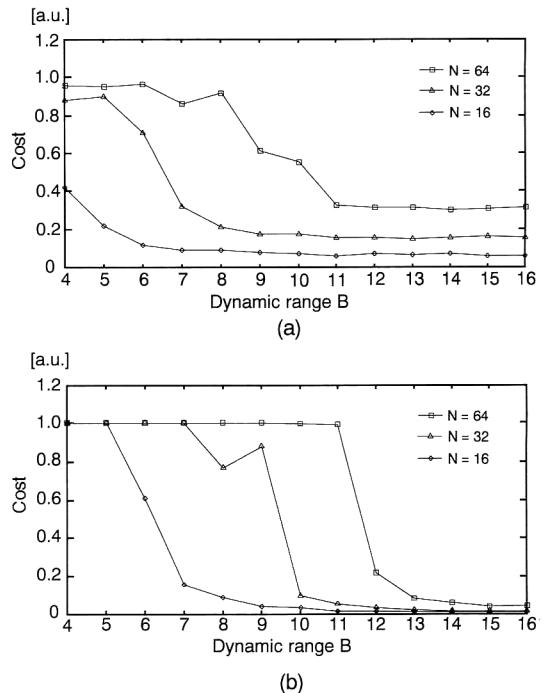


Fig. 5. Dependence of final cost function on dynamic range of image sensor to correct defocusing, obtained by computer simulation. The optimization algorithm is (a) the genetic algorithm, (b) the simulated annealing algorithm.

数は、 $N=16$ ,  $N=32$  および  $N=64$  の場合で、それぞれ 20,000 回, 50,000 回および 100,000 回である。

以上の計算機シミュレーションの結果より、ハイブリッドシステムの制御アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを用いると、シミュレーティド・アニーリングを用いる場合と比較して、小さなダイナミックレンジにより多くの解像点数を扱うことができ、短時間で波面の補正が可能であることがわかる。筆者らの実験装置のイメージセンサーのダイナミックレンジは 128 階調 ( $B=7$ ) であるので、シミュレーティド・アニーリングを用いた場合は解像点数が  $16 \times 16$  ( $N=16$ ) までしか扱えなかつた<sup>9)</sup> のに対して、遺伝的アルゴリズムを用いると解像点数が  $32 \times 32$  ( $N=32$ ) まで扱えることがわかる。

## 4. 実験

### 4.1 実験装置

遺伝的アルゴリズムを適用したハイブリッドシステムを用いて、波面補正の実験を行った。

像面での光強度分布の測定には、CCD カメラとフレームメモリーの組み合わせを用いた。CCD カメラとフ

フレームメモリーの間はビデオ信号で接続した。この検出部のダイナミックレンジを測定したところ 64 階調 ( $B=6$ ) であったが、5 回の加算平均を行うことで 128 階調 ( $B=7$ ) までダイナミックレンジを向上させた。したがって、計算機シミュレーションの結果より解像点数を  $32 \times 32$  ( $N=32$ ) とした。

位相変調液晶素子としてはガラス基板に対して平行配行させたネマチック液晶を用い、位相分布はビデオ信号を介してフレームメモリーで制御した。位相変調液晶素子の有効変調面積は  $10.73 \text{ mm} \times 8.38 \text{ mm}$  ( $226 \times 209$  ピクセル) で、この領域を  $32 \times 32$  の解像点に分割するようにフレームメモリーを制御した。位相変調の階調数は 16 とした。位相変調液晶素子は  $2\pi$  の位相変調量を有し、位相変調特性には若干の非線形性があるが、本システムでは最適化の過程において自動的に補正される<sup>9)</sup>。

レンズの焦点距離は 250 mm である。光源としては、波長 633 nm の He-Ne レーザーを用いた。物体距離と

像距離はともに 500 mm とした。物体面に配置したピンホールの直径は  $30 \mu\text{m}$  である。

波面の劣化要因としては、焦点ずれと位相物体の挿入の 2 種類を用いた。焦点ずれとしては、Fig. 6(a) に示すように、物体面の位置をレンズから遠ざかる方向に距離 14 mm だけ移動した。また、位相物体としては、均一な厚さをもつ位相物体と不均一な厚さをもつ位相物体の 2 種類を用いた。均一な厚さの位相物体としてはスライドガラスを用い、Fig. 6(b) に示すように、その一辺が光軸と一致するように光路中に挿入した。不均一な厚さの位相物体としては透明な接着剤を表面に付着させたスライドガラスを用い、Fig. 6(c) に示すように光路中に挿入した。位相物体の挿入位置は両者ともレンズから物体側へ 50 mm の位置とした。

遺伝的アルゴリズムの選択・淘汰、交差および突然変異の方法は、計算機シミュレーションの場合と同様である。

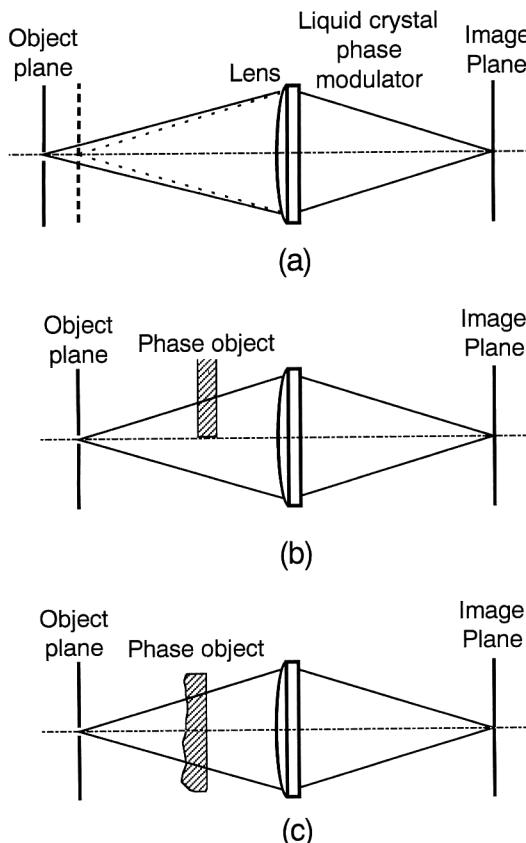


Fig. 6. Degradation of wavefront by (a) defocusing, (b) flat-surface phase object, and (c) rough-surface phase object.

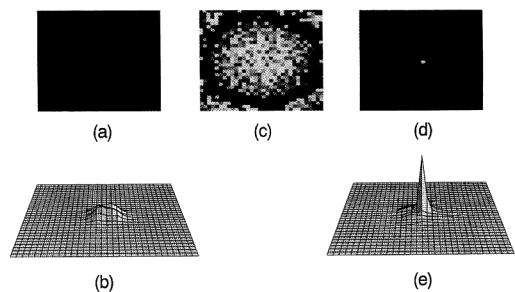


Fig. 7. Experimental results of correction of defocusing. (a) intensity distribution, (b) 3 D representation of defocused point-spread function, (c) phase distribution optimized by the hybrid system, and (d) intensity distribution, (e) 3 D representation of corrected point-spread function.

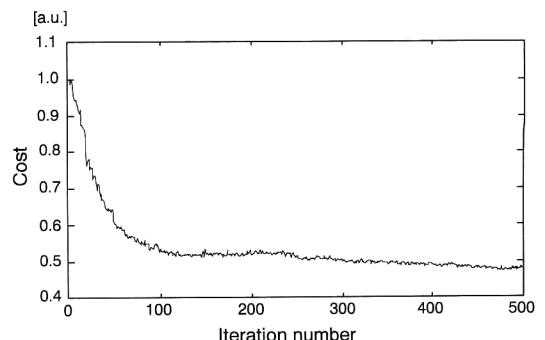


Fig. 8. Decrease of cost function to correct defocusing by the experimental system.

## 4.2 実験結果

Fig. 7 に焦点ずれによる波面の劣化を補正した実験結果を示す。焦点ずれによって劣化した点像応答関数の光強度分布を同図(a)に、その3次元表示を同図(b)に示す。ハイブリッドシステムによって最適化した瞳面での補正位相分布を同図(c)に、補正された点像応答関数の光強度分布を同図(d)に、その3次元表示を同図(e)に示す。ただし、位相分布は濃淡画像で表した。最適化の途中での評価関数の最小値の変化の様子を Fig. 8 に示す。

波面の劣化要因として均一な厚さをもつ位相物体を用いた場合の実験結果を Fig. 9 に示す。同図(a)に劣化した点像応答関数の光強度分布と同図(b)にその3次元表示を、同図(c)に最適化によって得られた瞳面での補正位相分布を、また、同図(d)に補正された点像応答関数の光強度分布と同図(e)にその3次元表示を示す。点像

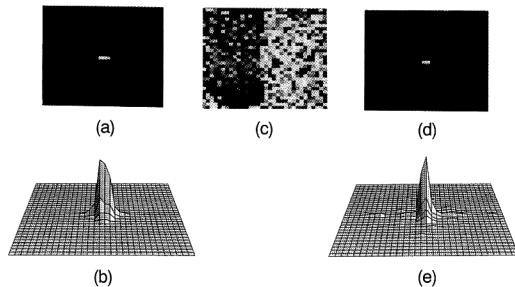


Fig. 9. Experimental results of correction of degradation by flat-surface phase object. (a) Intensity distribution, (b) 3 D representation of degraded point-spread function, (c) phase distribution optimized by the hybrid system, and (d) intensity distribution, (e) 3 D representation of corrected point-spread function.

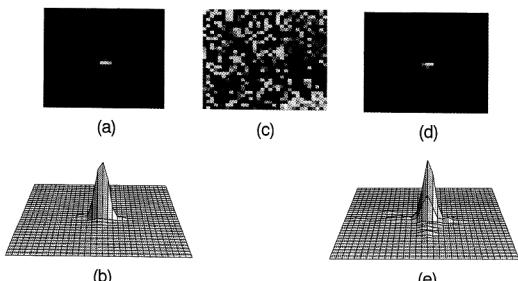


Fig. 10. Experimental results of correction of degradation by rough-surface phase object, (a) Intensity distribution, (b) 3 D representation of degraded point-spread function, (c) phase distribution optimized by the hybrid system, and (d) intensity distribution, (e) 3 D representation of corrected point-spread function.

応答関数の横方向の広がりが補正できていることがわかる。同様に、波面の劣化要因として不均一な厚さをもつ位相物体を用いた場合の実験結果を Fig. 10 に示す。図からはわかりにくいか、劣化した点像応答関数は中心から若干、左下の位置に広がった分布をもつが、これが補正できていることがわかる。

以上の実験結果から、ハイブリッドシステムに遺伝的アルゴリズムを適用することで、イメージセンサーのダイナミックレンジが 128 階調 (7 bits) の場合に  $32 \times 32$  の解像点数で波面の補正が行えることが確認できた。

## 5. 考 察

ハイブリッドシステムの波面の補正精度を評価するために、補正前と補正後で点像応答関数のデルタ関数に対する標準偏差  $\sigma$  の値を計算した結果を Table 1 に示す。像面での光強度分布を  $u_{ij}$  ( $-N/2 \leq i < N/2, -N/2 \leq j < N/2$ ) で表し、 $i=j=0$  のときにのみ値 1 をもつデルタ関数を  $\delta_{ij}$  で表し、標準偏差  $\sigma$  を次式を用いて計算した。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i,j} (\delta_{ij} - c u_{ij})^2 / N^2} \quad (1)$$

$$c = u_{00} / \sum_{i,j} u_{ij}^2 \quad (2)$$

また、点像応答関数の光強度分布がデルタ関数のピーク位置に集光している割合、すなわち集光率  $\eta$  についても Table 1 に示す。ただし、像面での光強度分布は物体であるピンホールと点像応答関数のコンポリューションであることを考慮して、デルタ関数のピーク位置のまわりの 8 近傍点も計算に含めた値を括弧内に示す。

Table 1 より、すべての場合で、補正により標準偏差の値が小さくなり集光率の値が大きくなっていることが確認できる。焦点ずれが最もよく補正でき正在、不均一な厚さの位相物体の挿入による劣化の補正が最も難しかったことがわかる。

筆者らが以前に研究を行ったシミュレーティド・アニーリングを用いたハイブリッドシステム<sup>9)</sup>では、焦点ずれの補正が収束するまでに約 5,000 回の繰り返し数を

Table 1. Experimental results for correction of degraded wavefront.

	Standard deviation $\sigma$		Light concentration $\eta$	
	Degraded image	Corrected image	Degraded image	Corrected image
Defocusing	0.0152	0.00520	0.0436 (0.438)	0.513 (0.860)
Flat-surface phase object	0.0128	0.00981	0.213 (0.837)	0.393 (0.929)
Rough-surface phase object	0.0152	0.0115	0.0912 (0.843)	0.286 (0.901)

要した。Fig. 8 からわかるように、遺伝的アルゴリズムを用いた場合は約 100 回の繰り返し数で収束した。ただし、個体数が 50 個であることを考えると、収束時間はほぼ等しい。しかし、シミュレーティド・アニーリングを用いたときは解像点数が  $16 \times 16$  で、今回の遺伝的アルゴリズムを用いた場合は解像点数が  $32 \times 32$  であることを考えると、最適化に要する時間が短縮できたと考える。

実験に用いたハイブリッドシステムでは、位相変調と光強度分布の測定にビデオ信号を用いている。したがって、システムの動作速度はビデオレートに制約される。また、最適化アルゴリズムに遺伝的アルゴリズムを用いた場合でも、最適化にやはり多くの繰り返し回数を必要とする。したがって、本システムは静的な波面の劣化に対してのみ有効である。最適化に要する時間を短縮するためには、処理速度の速い計算機を用いて計算機内での処理の割合を大きくし、位相変調の更新と光強度の測定を行う回数を少なくすることが考えられる。そのためにには、計算機処理に位相回復アルゴリズムを導入することが考えられるが、これは今後の課題である。

## 6. 結 語

像面での光強度分布の測定をもとにレンズの瞳面での位相分布を制御して波面の補正を行うハイブリッドシステムの制御アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを適用することを提案し、その有用性を計算機シミュレーションおよび実験で確認した。その結果、制御アルゴリズムとしてシミュレーティド・アニーリングを用いる従来の方法と比べて、(1)光検出器に必要なダイナミックレンジを小さくできること、(2)最適化に要する時間が短縮できることがわかった。

本実験を遂行するにあたり、液晶パネルをご提供いただいたシチズン時計株式会社に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) B. Hulburd and D. Sandler: "Segmented mirrors for atmospheric compensation," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 1186-1190.
- 2) B. H. Anderson, D. M. Moore and J. L. Fanson: "Continuous facesheet low voltage deformable mirror," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 1191-1198.
- 3) J. Amako and T. Sonehara: "Kinoform using an electrically controlled bierfringent liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4622-4628.
- 4) G. D. Love, J. S. Fender and S. R. Restatino: "Adaptive waveform shaping with liquid crystals," *Opt. Photonics News*, **6** (1995) 16-21.
- 5) D. Bonaccini, G. Brusa, S. Esposito, P. Salinari and P. Stefanini: "Adaptive optics waveform corrector using addressable liquid crystal retarders," *Proc. SPIE*, **1334** (1990) 89-97.
- 6) M. A. Vorontsov, V. A. Katulin and A. F. Naumov: "Wavefront correction by an optical feedback interferometer," *Opt. Commun.*, **71** (1989) 35-38.
- 7) R. Dou and M. K. Giles: "Closed loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1583-1585.
- 8) 高木康博, 大頭 仁: "画像処理機能を有する回折型液晶アクティブ光学素子", *光学*, **22** (1993) 573-580.
- 9) Y. Takaki and H. Ohzu: "Reconfigurable lens with an electro-optical learning system," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6896-6908.
- 10) P. J. M. van Luanhoven and E. H. L. Aarts: *Simulated Annealing: Theory and Applications* (Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1987).
- 11) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr. and M. P. Vecchi: "Optimization by simulated annealing," *Science*, **220** (1983) 671-680.
- 12) D. Lawrence: *Genetic Algorithm and Simulated Annealing* (Kaufmann, Los Altos, California, 1987).
- 13) D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1987).
- 14) U. Mahlab, J. Shamir and H. J. Caulfield: "Genetic algorithm for optical pattern recognition," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 648-650.
- 15) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: "Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 752-754.