

新しい波面制御法を用いたハルトマン方式補償光学装置

一ノ瀬祐治, 妹尾 誠

(株)日立製作所 電力・電機開発本部 〒319-1221 日立市大みか町 7-2-1

An Adaptive Optical System with a New Wavefront Control Algorithm and a Hartmann Wavefront Sensor

Yuuji ICHINOSE and Makoto SENOO

Power & Industrial Systems R & D Division, Hitachi Ltd., 7-2-1, Omika, Hitachi 319-1221

An adaptive optical system (AO) with a new algorithm providing wavefront control is described. The algorithm determines actuator commands of a deformable mirror to minimize the difference between the actuator's stroke and the average of the predicted wavefront which is orthogonal to the actuator. If actuators are arranged in a square ($N \times N$), the algorithm can reduce the amount of processing from N^4 to $2N^3$. The AO has a deformable mirror with 64 actuators and a Shack-Hartmann wavefront sensor (WFS), which detects a wavefront slope by using 17×17 lenses. The stroke range of the mirror is about $5.4 \mu\text{m}$ and the actuator spacing is 4 mm. The lens spacing (d) is 2 mm and the slope resolution of the WFS is $1/20 (\lambda/d)$. Experimental results show the AO can correct the distorted wavefront within a phase error of 0.1λ rms. The permitted arrangement error between the WFS and the deformable mirror is a quarter of the actuator spacing.

1. はじめに

補償光学系とは、レーザーあるいは光波の等位相面（波面）の歪みを検出し、ミラー面の凹凸を制御すること等により波面歪みを補正するものである。波面歪みの要因としては、レーザー自体の歪み、光学系の形状歪みおよび大気等、伝搬媒質の屈折率分布等がある。補償光学系を天体望遠鏡やレーザー共振器等の光学装置に適用することで、分解能やビーム品質の向上が期待できる¹⁻³⁾。

マイクロ波と異なり光の位相量は直接検出できないため、光の干渉像⁴⁾や焦点位置の変化⁵⁾から光の波面を検出する方式が開発されてきた。これらの波面検出器では、波面の傾き分布すなわち波面の微分値を検出するため、形状可変鏡のミラー面の変位量を決定するには制御演算が必要になる。その演算量は、波面検出器および形状可変鏡の空間分解能に比例する。補償光学系の補償効率は波面歪みと形状可変鏡の空間周波数の比に比例し、大型天体望遠鏡に補償光学系を適用する場合には、数百以上の形状可変鏡の駆動素子が必要とされる⁶⁾。駆動素子数の増加に伴い制御演算量が増大するため、従来は制御装置のハードウェアの

高速化により⁷⁾、必要な制御速度を確保する試みがなされてきた。

筆者らは先に、新しい波面制御法を考案し、その有効性を計算機シミュレーションにて検証した⁸⁾。本制御法は、形状可変鏡の駆動素子と直交する領域の波面平均値と、素子位置の波面との差を制御偏差として制御するものであり、制御演算量を削減できる。また従来法では波面の微分値である波面検出値とあらかじめ測定したミラー面の応答関数から制御量を決定するのに対し、本法は波面検出値のみから制御可能であり、簡便な制御法といえる。本研究では、提案した波面制御法を実現できる補償光学装置を試作し、実験によりその波面制御性を検証した結果について報告する。

2. 補償光学装置の概要

2.1 全体構成

Fig. 1 に補償光学実験装置の全体構成を、Table 1 に主な仕様を示す。波長 633 nm の He-Ne レーザー発振器から出力される $\phi 80$ mm のレーザービームを、ミラー寸法 35×50 mm の形状可変鏡に入射角 45° で入射させ、その反射波をハルトマン (Shack-Hartmann) 波面検出器に入射

E-mail: ichinose@erl.hitachi.co.jp

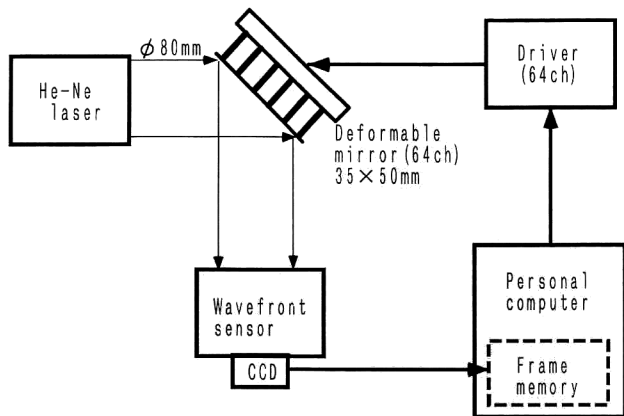


Fig. 1. Diagram of experimental apparatus.

する。形状可変鏡の後段に設置された波面検出器に入射される波面をフィードバックする制御系が構成されており、形状可変鏡の出力波面（約 35×35 mm）を任意の分布にすることが可能である。

パソコンよりなる制御装置にはフレームメモリーを取り付けており、波面検出器の CCD (charge coupled device) からの映像信号を取り込み、縦 (y) および横 (x) 方向の波面傾きをプログラム演算により検出する。その検出値から形状可変鏡の制御量を演算し、GPIB (general purpose interface bus) を介して駆動電源に出力する。駆動電源では、駆動電圧 100 V を 12 bit で表した制御信号を受け、駆動電圧に変換し形状可変鏡に出力する。

2.2 形状可変鏡

Fig. 2 に形状可変鏡と圧電素子アレイの構造を示す⁹⁾。形状可変鏡は縦 35 mm、横 50 mm のミラー面を、その下部に設けた 8×8 配列の積層型圧電素子により変形させる構造である。圧電素子の高密度化と素子破損時の交換性を考慮し、積層型圧電素子を 1 次元方向にアレイ化した、45° 反射したビームを縦横同じ間隔で制御できるように、圧電素子間隔を 4 mm (横方向)、アレイ間隔を 5.65 mm (縦方向) と 1 対 2^{1/2} の比にしている。形状可変鏡の縦および横方向の素子数は 8 個であるため、制御可能なレーザービームの大きさは 28×28 mm となる。

圧電素子単体では印加電圧 100 V に対して 10 μm 変位するが、ミラーに取り付けるとその変位量は約 5.4 μm に低下する。圧電素子のヒステリシス特性やミラーより受ける反力が素子ごとに異なるため、駆動電圧に対するミラー変位量は駆動電圧および駆動素子ごとに変化する。

形状可変鏡のミラー面は、組み立て誤差および周囲温度変化により約 3λ (λ=633 nm) の歪みが存在する。したがって、駆動素子によるミラー面変位量 (5.4 μm) から、ミラー面歪み量を差し引いたものが、実質的な波面制御範囲

Table 1. Specifications of the adaptive optical system.

He-Ne laser
• Power: 2 mW
• Wavelength: 633 nm
• Beam diameter: 80 mm
Deformable mirror
• Mirror size: 35×50 mm
• Actuator numbers: 64 (8×8)
• Mirror stroke: 5.3 μm
• Cut-off frequency: 10 kHz
Wavefront sensor
• Type: Shack-Hartmann
• Effective diameter: 50 mm
• Spatial resolution (d): 2 mm
• Slope resolution: 0.05 (λ/d)
• Interval: 30 Hz
Personal computer
• CPU: 80486, 66 MHz
• Frame memory: 640×512×8 bit
Driver
• Numbers: 64
• Maximum voltage: 100 V
• Resolution: 0.025 V
• Interface: GPIB

となる。

2.3 ハルトマン波面検出器

ハルトマン波面検出器はレンズ焦点像の重心変化から、レンズを通過する領域の波面の傾きを検出するものである。Fig. 3 にその構成を示す。入射光を有効径 50 mm の縮小光学系で 1/5 に縮小後、一辺 0.4 mm、焦点距離 28 mm の方形レンズを 60×60 に配列したマイクロレンズアレイに波面を入力し、その焦点像を CCD で検出する。入射光は 1/5 に縮小されてレンズアレイに入力されるため、波面検出の空間分解能はレンズ径の 5 倍である 2 mm となっている。形状可変鏡の素子間隔は 4 mm であり、波面検出器はその 2 倍の空間分解能を有している。

波面傾きの分解能は、焦点像の光強度および CCD 画素サイズ等により変化するが、等価的なレンズ径 d (2 mm) とレーザー波長 λ の比で表すと、0.05 (λ/d) 程度であり、実用上十分な性能を有している。

2.4 波面制御法

波面検出器は上述したハルトマン方式以外にいくつか提案されているが、光の位相は直接検出できないため他方式でも検出値は波面傾き (微分値) である。形状可変鏡の駆動電圧は位相に比例するため、波面検出値を積分して位相量に変換する必要があった。これを効率よく演算し制御する手法として、応答関数行列法が用いられてきた¹⁰⁾。この手法は、各駆動電圧それぞれに対する波面検出値の分布 (応答関数行列) をあらかじめ測定しておき、波面歪みを補

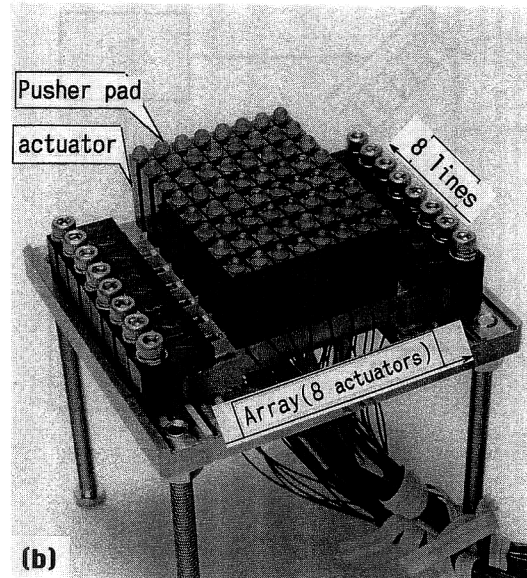
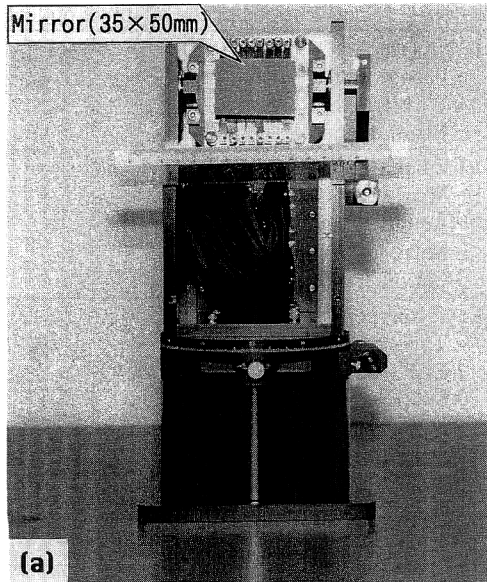


Fig. 2. Photograph of the deformable mirror. Features: (a) Mirror size 35×50 mm, mirror material: Quartz glass, stroke 5.3 μm, bandwidth 10 kHz. (b) Mirror thickness 1 mm, number of arrays 8, number of actuators 8×8, actuator spacing 4 mm.

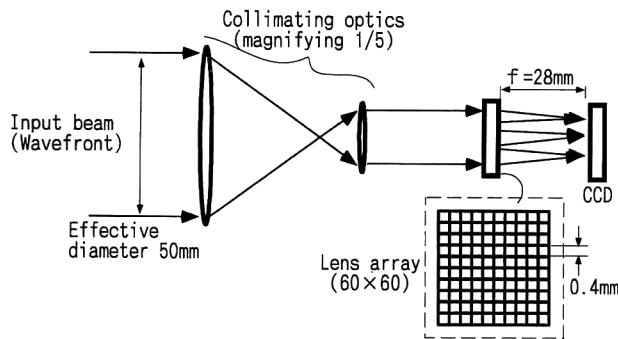


Fig. 3. Diagram of the Hartmann wavefront sensor.

正するための制御量（各駆動電圧）を波面検出値と応答関数行列の行列演算にて求めるものである。このため、応答関数行列の測定誤差が制御誤差になること、および制御演算量が駆動素子数と波面検出値の数（レンズ数）に比例して増えるという問題があった。

本制御法は応答関数を用いずかつ制御演算量を低減することを目的に考案したものである。Fig. 4 にその原理図を示す。本方式では、波面検出器のレンズアレイおよび形状可変鏡の駆動素子とともに格子状に配列し、その配列方向も一致させる。従来法では波面歪みと大きさが同じで符号が逆の波面を形状可変鏡で作り波面を補正するのに対し、本方式は波面歪みの平均値に形状可変鏡の出射波面を揃えようとするものである。そして波面歪み全体の平均値を計算し制御するのではなく、ある駆動素子の制御を求める場合にはその駆動素子と直交する領域のみの波面平均値を用

いることにより制御演算量を低減する。例えば Fig. 4 に示す素子 1 の制御演算では、斜線でハッチした波面の平均値と素子 1 の位相との差を制御偏差とし、偏差をゼロとするフィードバック制御を行う。平均値を求める波面以外で外乱が発生した場合、最初の制御ステップでは応答しないが、次のステップではその影響が該当する波面領域に現れるため、応答性の低下は小さい⁸⁾。

2.5 波面制御プログラム

制御装置であるパソコン上で実行する波面制御プログラムのフローチャートを Fig. 5 に示す。まず、波面検出および制御演算処理に関するパラメーターや駆動電源との通信に用いる GPIB ボードおよび波面検出器の映像信号を取り込み格納するフレームメモリーを初期設定する。そして制御終了の外部指令が与えられるまで、映像信号の取り込み、波面傾き検出、制御演算および制御信号出力の一連の処理を繰り返す。

ルーチンの最初にレンズ焦点像をフレームメモリーに 256 階調の輝度情報として書き込む。そして映像信号の SN 比を向上させるための積算処理をし、その画像情報をメインメモリー上に格納する。各レンズ焦点像の中で、制御演算に用いる像の数、位置および像の重心を計算する領域（画素数）は初期設定にてあらかじめ設定しており、波面傾き検出では画像情報から各重心計算領域ごとに x および y 方向の重心位置を計算し、レンズ焦点距離 f で除して波面傾きを検出する。このときの x 方向傾きを $G_x[m,n]$ 、 y 方向傾きを $G_y[m,n]$ と表す。ここで m, n は制御に用い

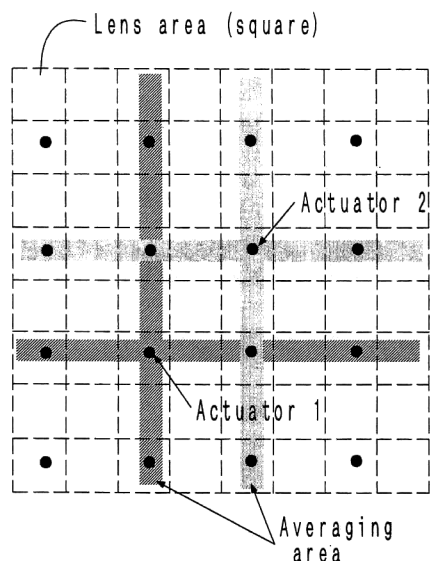


Fig. 4. Location of actuators on the mirror and lenses in the wavefront sensor. Each actuator command is determined as the difference between the actuator's stroke and the average of the predicted wavefront which is orthogonal to the actuator.

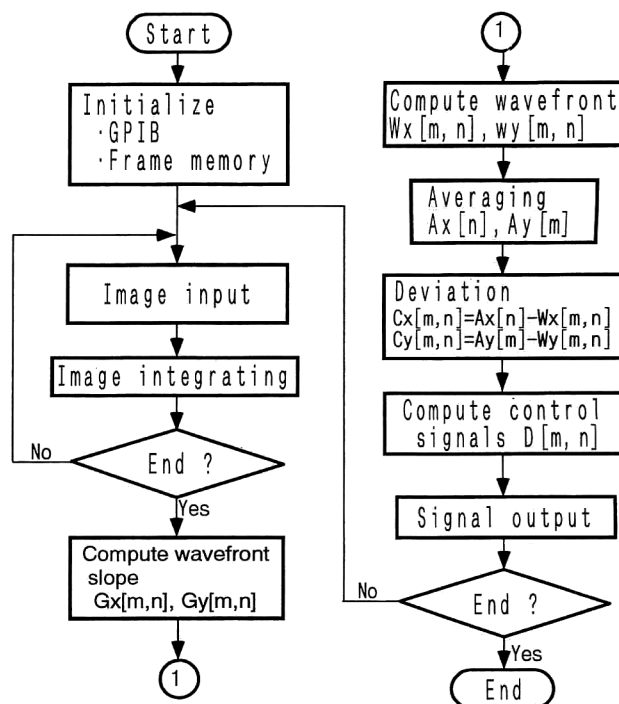


Fig. 5. Flow chart of the algorithm.

る $M \times N$ のレンズ焦点像の配列番号である。

本制御法ではまず、波面傾き G_x , G_y を用いて次式の積和演算により x , y 方向の波面 W_x , W_y を求める。

$$W_x[m,n] = d \cdot \sum_{i=1}^m G_x[i,n] \quad (1)$$

$$W_y[m,n] = d \cdot \sum_{j=1}^n G_y[m,j] \quad (2)$$

ただし、 d : レンズ径 (レンズ間隔)。

次に、 W_x , W_y の 1 次元方向の平均値を次式により計算する。

$$A_x[n] = \sum_{i=1}^M W_x[m,n] / M \quad (3)$$

$$A_y[m] = \sum_{n=1}^N W_y[m,n] / N \quad (4)$$

ただし、 M : x 方向のレンズ数、 N : y 方向のレンズ数。

ここで、 x 方向の波面平均値 A_x の要素数は N であり、 y 方向の波面平均値 A_y の要素数は M である。

形状可変鏡の駆動素子がレンズ中心位置 $[m,n]$ にあれば、制御偏差 C_x , C_y は 1 次元方向の平均値 A_x , A_y と波面 W_x , W_y との差として次式により求め、

$$C_x[m,n] = A_x[n] - W_x[m,n] \quad (5)$$

$$C_y[m,n] = A_y[m] - W_y[m,n] \quad (6)$$

制御信号 $D[m,n]$ は次式の積分制御により計算する。

$$D[m,n] = \text{gain} \cdot (\int C_x[m,n] \cdot dt + \int C_y[m,n] \cdot dt) \quad (7)$$

ただし、 gain : 積分制御ゲイン。

もし駆動素子がレンズ中心と異なる位置にある場合に

は、駆動素子を囲む 4 点のレンズ中心位置での制御量 $D[m,n]$, $D[m+1,n]$, $D[m+1,n+1]$, $D[m,n+1]$ を式 (7) で求め、駆動素子と 4 点との距離を基にした線形補間により制御信号を計算する。最後に、GPIB を介して制御信号 (64 ch) を駆動電源に出力する。

ルーチン処理時間は全体で 313 ms であり、その内訳は画像取り込み積算に 267 ms、波面傾き検出に 36 ms、制御その他に 10 ms である。画像取り込み積算処理の時間は、積算回数が 1 回増えるごとに 221 ms 増加する。画像取り込み積算処理および波面傾き検出処理 (レンズ焦点像の重心計算) は、汎用の画像処理ボードを用いて実現することが可能であり、本制御装置でも画像のフレーム周波数程度 (60 Hz) の制御周期は容易に達成できる。

3. 実験結果および検討

3.1 制御パラメーター

波面制御プログラムで設定する各種パラメーターの中で、波面制御に関連するものを Table 2 に示す。Fig. 6 にはフレームメモリー上での、波面検出器のレンズアレイと形状可変鏡の駆動素子の位置関係を示す。形状可変鏡の駆動素子数は 64 であり、駆動素子の番号は左下が No. 1 であり上方に向かって昇順となっている。形状可変鏡への入射角が 45° であればフレームメモリー上での素子間隔は x , y 方向とも一致するが、角度ずれのため Table 2 の素子

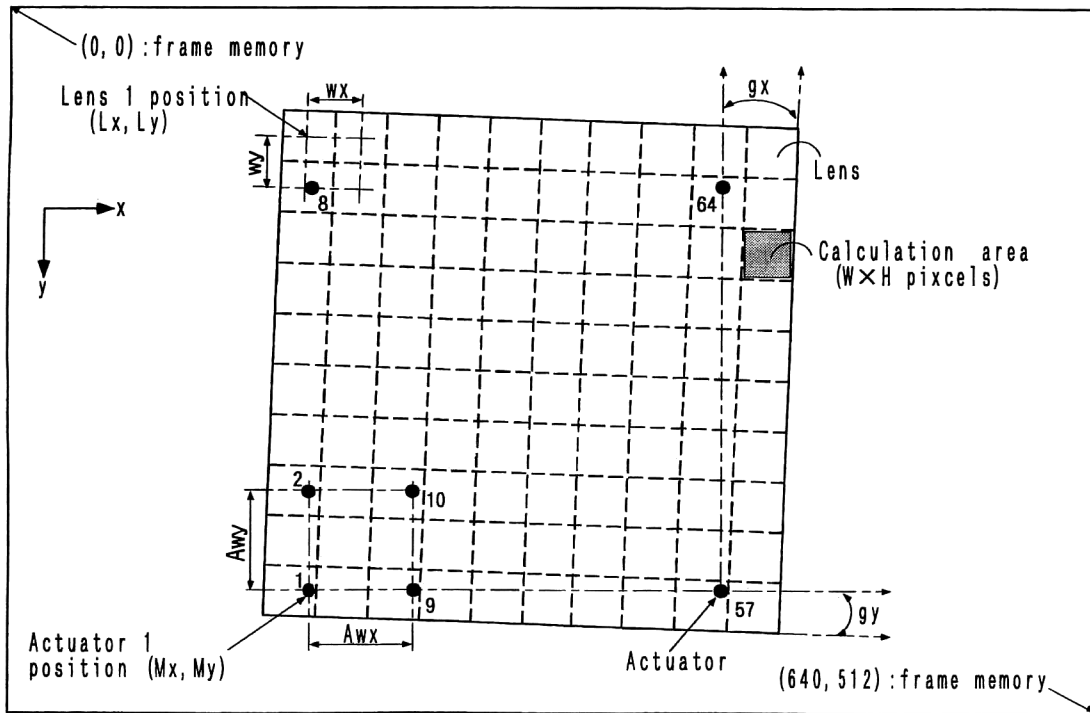


Fig. 6. Location of actuators and lenses on the frame memory.

Table 2. Parameters of the wavefront control program.

Item	Symbol	Value
Numbers of lens	(M, N)	(17, 17)
Lens 1 position	(L_x, L_y)	(170, 112)
Lens spacing	(w_x, w_y)	(17.6, 17.8)
Wavefront calculation area	(W, H)	(17, 17)
Gradient of actuator vs. pixel	(g_x, g_y)	(1.0, -1.0)%
Actuator 1 position	(M_x, M_y)	(191, 380)
Actuator spacing	(A_{wx}, A_{wy})	(36.9, 35.6)

間隔は一致してはいない。

波面検出器のレンズ数は 60×60 であるが、制御に使用するのは Table 2 に示すように 17×17 である。レーザービーム面積に換算すると $34 \times 34 \text{ mm}^2$ となる。レンズ焦点像を撮像する CCD の画素配列方向に対して、形状可変鏡の駆動素子配列方向は一致しているが、レンズアレイは組み立て誤差により傾いているため、レンズアレイの傾き g_x, g_y を設定しプログラム上で補正している。1つのレンズ焦点像の重心位置を計算する領域の画素数は、レンズ間隔 17.6 画素より小さい 17×17 画素に設定した。

重心計算領域 (17×17 画素) にはレンズ像が含まれてない画素もあり、その画素輝度を含めて重心計算すると背景光雑音により検出誤差が大きくなる。このため、閾値以上の輝度をもつ画素のみを用いて検出している。また波面検出器の分解能と検出限界はレーザー強度や画素サイズに依存するが、実験条件を一定にするため重心位置を 0.1 画素

Table 3. Displacement of the deformable mirror. The displacement is measured at the mirror positioned above the actuators arranged in a square (8×8). The unit is μm .

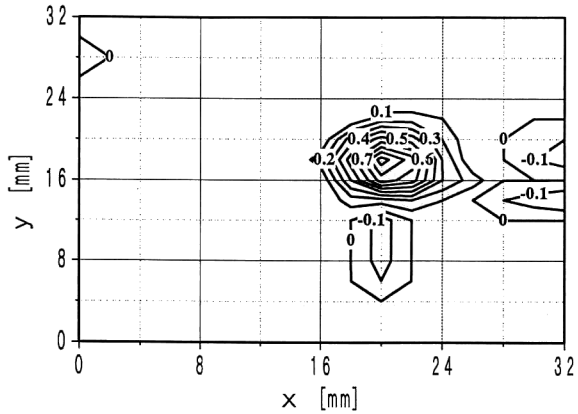
No.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6.5	5.7	5.1	5.7	5.8	6.2	6.3	6.3
2	5.5	5.9	5.3	4.7	5.4	5.4	5.2	5.3
3	6.0	4.2	4.9	4.9	4.3	4.3	5.4	4.8
4	5.1	5.7	4.5	5.2	4.7	4.5	5.2	5.2
5	5.2	5.1	4.6	5.0	4.7	4.1	5.3	4.9
6	5.5	5.0	4.7	5.1	4.7	4.4	5.2	5.2
7	6.1	5.4	4.3	4.9	5.5	4.8	5.9	5.2
8	7.1	6.1	5.7	6.3	5.9	6.2	6.6	6.6

単位で量子化した。波面傾きに換算すると、その値は $0.041(\lambda/d)$ となる。

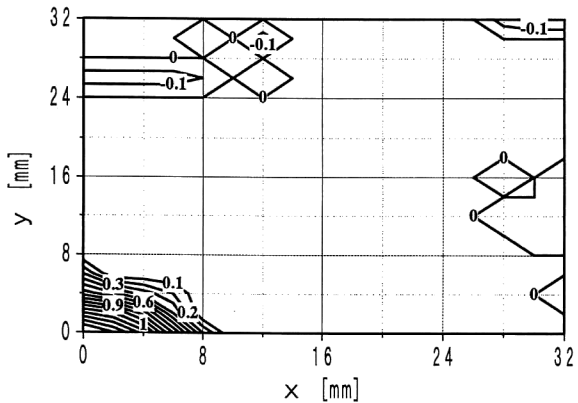
3.2 形状可変鏡のミラー面変位特性

形状可変鏡の駆動素子として使用した圧電素子単体では、印加電圧 100 V に対し、 $10 \mu\text{m}$ 変位する。Table 3 は形状可変鏡のミラー面変位量を、各駆動素子の真上で変位計にて測定したものである。ミラー反力の駆動素子位置による差および圧電素子とミラー間の接着剤厚みの差により、変位量に差が生じている。ミラー変位量の平均値は $5.4 \mu\text{m}$ であった。このような変位係数の差は制御誤差および応答性の低下の要因となるおそれがある。

Fig. 7 は 64 個の駆動素子のひとつに 10 V 印加したときのミラー面変位分布であり、波面検出器の検出値から波面再構成演算し等高線図で表したものである。図中の変位量



(a) Actuator No. 35



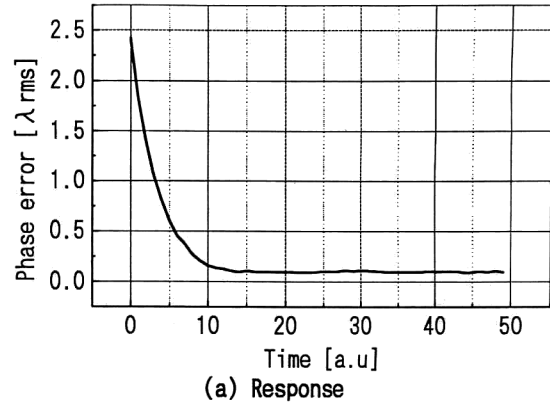
(b) Actuator No. 7

Fig. 7. Displacement of the deformable mirror surface. The displacement is measured by using the wavefront sensor. The unit of the graph is wavelength ($\lambda = 633 \text{ nm}$). (a) Actuator No. 35, which is located in the center of the mirror, is applied at 10 VDC and other actuators are not driven. (b) Actuator No. 7, which is located on the edge of the mirror, is applied at 10 VDC and other actuators are not driven.

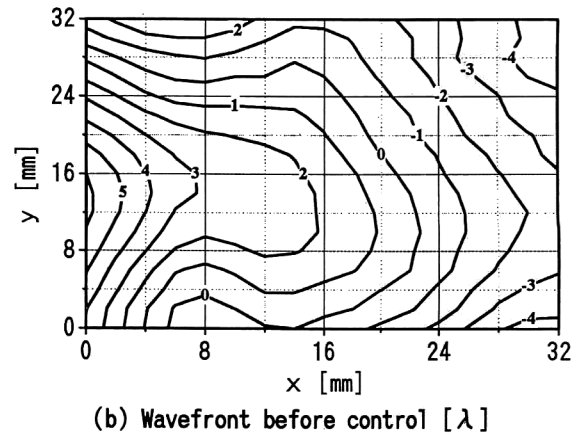
の単位は λ ($=633 \text{ nm}$) であり、正の値は凸面を、負は凹面を表す。形状可変鏡は 1 枚の石英ガラスミラー (厚さ 1 mm) を駆動素子で変形させる構造であり、中央部の素子 (位置 [20, 18] mm) に変位を与えた Fig. 7(a) では、素子真上の変位が 0.95λ であり、4 mm 以上離れたミラー面までもその影響により変位している。同心円ではなく楕円状の等高線となっているのは、物理的な駆動素子間隔が x および y 方向で異なるためである。周辺部の素子 (位置 [4, 2] mm) を変位させた同図 (b) では、ミラー端部は保持されていないために駆動素子真上の変位が 1.1λ に対し、位置 [0, 0] mm での変位は 1.7λ と大きくなっている。

3.3 ミラー面歪み補正

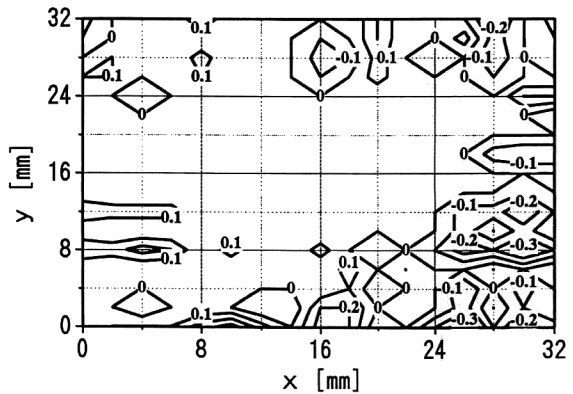
上述したように形状可変鏡のミラー面は組み立て時には数 λ 程度歪んでおり、補償光学系によりミラー面補正が可能か検証した。Fig. 8(a) は横軸に制御回数 (時間)、縦軸



(a) Response



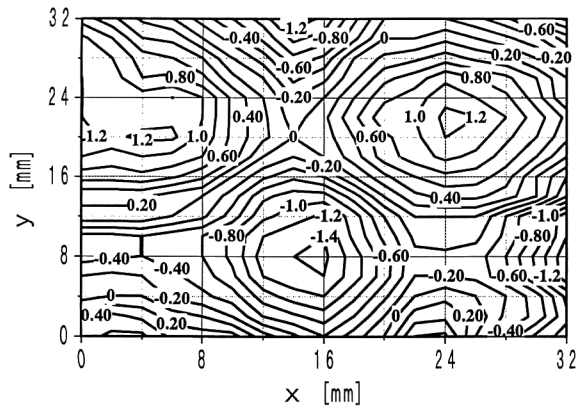
(b) Wavefront before control [λ]



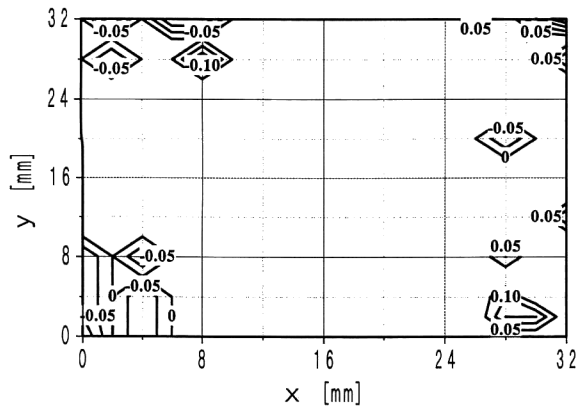
(c) Wavefront after control [λ]

Fig. 8. Experimental results. The AO corrects the mirror surface. Phase error before control is $2.4\lambda \text{ rms}$ and that after control is $0.098\lambda \text{ rms}$.

に波面歪みの大きさを表す波面分散値を示しており、約 $2.4\lambda \text{ rms}$ の歪みが制御により小さくなり、制御回数 15 程度で一定値 ($0.008\lambda \text{ rms}$) に整定しているのがわかる。また同図 (b), (c) は制御前後の波面の等高線図であるが、(b) の制御前波面では最大 10λ のミラー面高低差があるのに対し、(c) の制御後の波面は高低差 0.4λ 程度に波面歪みが小さくなっており、良好な波面制御が実現されているのがわかる。なお、制御可能なミラー有効面積は $28 \times 28 \text{ mm}^2$ でありその外側は制御できないため、同図 (c) でミラー周



(a) Wavefront before control [λ]



(b) Wavefront after control [λ]

Fig. 9. Experimental results of wavefront. The AO converts the wavefront computed by eq. (8). Phase error before control is 0.72λ rms and that after control is 0.040λ rms.

辺部に波面歪みが残っている。波面分散値は有効面積内の値である。

制御後の波面分散値は 0.098λ rms であり、これは制御誤差とサンプリング誤差によるものである。サンプリング誤差は、形状可変鏡の駆動素子間隔で制御できるミラー面凹凸より、波面歪みの凹凸の間隔が小さいために生じる。制御誤差のみを測定するには、駆動素子電圧印加時のミラー面を制御目標とすればよい。制御目標は形状可変鏡で作成した波面であり、これは制御により再現可能な波面であることから、制御後の波面分散値は制御誤差と考えることができる。

式(8)に制御目標とした波面の駆動素子電圧を示す。

$$W(x, y) = 5 \cdot \sin(3\pi x/D) + 5 \cdot \cos(2\pi y/D) + 50 \quad (8)$$

ただし、 x, y : 駆動素子の座標 (ミラー中央が原点), D : ミラー径 (=250 画素)。

すべての駆動素子電圧を 50 V 一定の状態から制御を開始した。Fig. 9 に示す制御前後の波面は制御目標との差であり、Fig. 8 と比較すると制御後の波面歪みが小さいこと

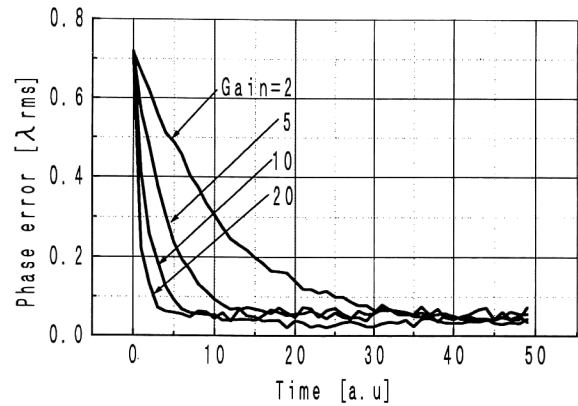


Fig. 10. Response of wavefront conversion. The AO converts the wavefront computed by eq. (8).

Table 4. Phase error and response against control gain. The unit of response is the control interval.

Control gain	Phase error [λ rms]	Response [a.u]
2	0.050	30
5	0.040	12
10	0.040	6
20	0.055	3

がわかる。Fig. 8(c) の波面は高低差 0.4λ 程度であるのに対し、Fig. 9(b) では 0.15λ である。また、制御後の波面分散値は 0.040λ rms であり、Fig. 8(a) の 0.098λ rms に比べサンプリング誤差がないために小さくなっている。なお、駆動素子にはヒステリシス特性があり、制御後の各駆動電圧は式(8)とは一致しない。

3.4 応答および制御誤差

Fig. 10 に積分制御ゲインを変え、式(8)の波面に対する応答特性を測定した結果を示す。Table 4 にそのときの波面分散値と応答速度を示す。波面分散値は制御回数 40~49 までの平均値を示しており、応答速度は制御前の波面分散値 0.72λ rms の 10% 以下に分散値が低下するまでの制御回数を示している。積分制御ゲインに比例して応答速度が速くなっているのがわかる。積分制御ゲイン 25 以上では制御系が発散した。

制御後の波面分散値は制御誤差と考えられるが、積分制御ゲインに比例して制御誤差は小さくなる。Table 4 の結果も同様に変化しているが、ゲイン 20 では逆に分散値は増えている。この原因は、ゲイン 20 では分散値の応答が発散気味であることから生じたものと考えられる。以上の結果から本制御系における最適積分制御ゲインの範囲は、安定限界の半分以下の 5~10 あたりと推測される。

上述までの実験では、画像積算回数は 5 回に設定したが、積算回数を変えると制御誤差も変化する。時間的にラ

ランダムな背景光ノイズおよび CCD 自身のノイズは、画像積算処理することによりその影響を低減でき、一般的には積算回数の平方根に比例して小さくなる。実験では、積算回数 1 で分散値は 0.053λ rms であり、積算回数が増えるほど分散値は小さくなり積算回数 10 で最低値の 0.022λ rms が得られた。しかし、積算回数 20 以上では分散値は逆に大きくなった。これは、レーザービームの伝搬経路に存在する空気にゆらぎが発生し、画像を積算処理する間に各レンズ焦点像がゆらぎにより変化したためと考える。

制御誤差はサンプリング誤差とは異なり、波面歪みの大きさ、分布によらず一定である。制御誤差の要因は、波面検出器の検出誤差と制御演算中の桁落ちによる演算誤差等である。本制御系は波面歪みを最小化するフィードバック制御系が構成されているため、演算誤差は相対的に小さいと思われる。波面検出誤差の要因は、上述した時間的にランダムなノイズのほか、重心位置を 0.1 画素単位で量子化した量子化誤差である。量子化幅を小さくすることで誤差を減らすことが可能であるが、ランダムノイズより小さくしても無意味であり、CCD、背景光、光源自体で発生するノイズが制御誤差を決定する最大要因である。

3.5 駆動素子位置設定誤差の影響

従来の制御法では補償光学系を構成後、駆動電圧に対する波面検出器出力の応答関数行列を測定しその応答関数を用いて制御するため、形状可変鏡と波面検出器の位置決め精度はあまり要求されない。本制御法では応答関数を用いず制御演算量を低減できる代わりに、両者の位置を正確に測定する必要がある。したがって、測定誤差や環境温度変化による位置ずれは、波面制御精度に影響する。

Fig. 11(a) は駆動素子位置を x および y 方向に移動した場合の、制御後の波面分散値を測定したものである。移動量に比例し分散値が大きくなっている。駆動素子間隔 4 mm はフレームメモリー上では 35.2 画素に相当するが、図より素子間隔の 1/4 程度の移動量であれば分散値の変化は小さくその影響は無視できる。このように位置ずれに対し許容幅が大きいのは、3.1 節で述べたように駆動素子の変位が隣接する駆動素子付近まで連成するミラー面変位特性が影響している。また、正負の移動量に対し分散値が対称とならないのは、原点ずれのほか、以下の原因が考えられる。波面検出器のレンズと形状可変鏡の駆動素子との位置関係は、Fig. 6 および Table 2 に示しているが、移動量が大きくなると駆動素子が波面検出領域の外側にはみ出す。その移動画素数は、 x 方向では +11 画素と -30 画素であり、 y 方向では +26 画素と -18 画素である。駆動素子位置が波面検出領域外にあると、その駆動素子は制御しない

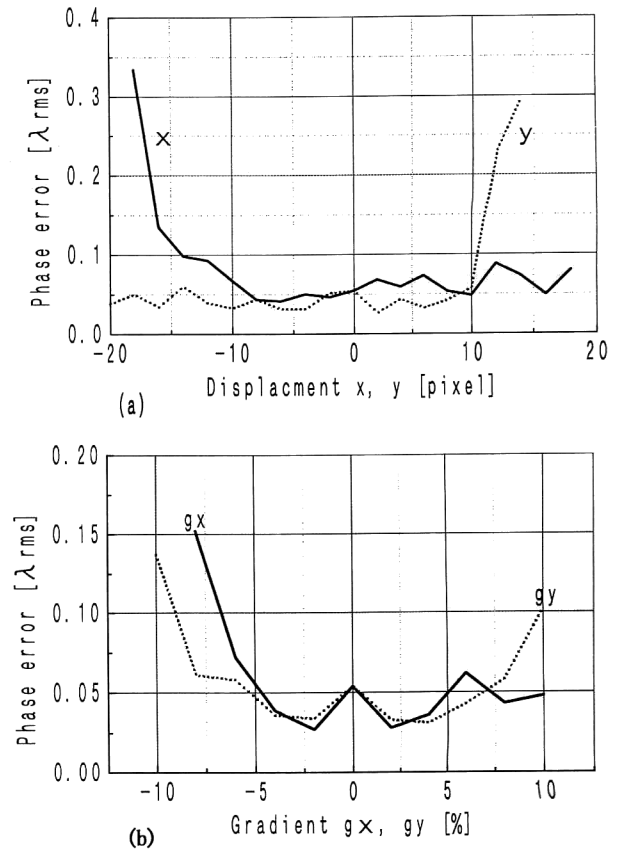


Fig. 11. Influence of arranging error. Phase error after control is measured when actuator position is moved. (a) Moving direction x or y . The unit is a pixel of the frame memory. (b) Gradient direction x or y .

ため、位置ずれによる制御誤差が大きくならなかったものと考えられる。

Fig. 11(b) は駆動素子を x あるいは y 方向に傾けた場合の波面分散値であり、傾きの単位%は傾斜の割合を示すものであり、10%であれば10画素離れたところで1画素傾くことを表す。図から4%程度までの傾きであればその影響は小さいことがわかる。駆動素子8素子の間隔は246画素であり、4%の傾きがあれば最大10画素駆動素子位置が移動する。同図(a)の平行移動の結果も10画素程度の移動までは制御が可能であり、傾きの影響はほぼ一致する。以上より、駆動素子の位置設定誤差の許容値は駆動素子間隔の1/4、すなわち8.8画素程度であることがわかる。

4. ま と め

制御演算量の低減を目的に考案した波面制御法を用いた補償光学装置を開発し、形状可変鏡自体の歪みの補正や波面の変換実験を行い、その有効性を評価した。本制御法は、形状可変鏡の駆動素子位置の位相とその駆動素子と直交する領域の波面平均値との差を制御偏差とし、駆動素子ごと

にそれぞれ最小化するものであり，制御に駆動電圧に対する形状可変鏡の応答関数を必要としない．素子間隔 4 mm で 8×8 に配列した圧電素子より駆動される形状可変鏡と，17×17 のレンズアレイをもつハルトマン波面検出器（空間分解能 2 mm）およびパソコンからなる補償光学装置において，波面制御誤差 $\lambda/20$ 以下を達成できた．さらに，形状可変鏡と波面検出器の位置決めにおける最大許容誤差は，駆動素子間隔の 1/4 であることを確認した．

文 献

- 1) F. Merkle, G. Gehring, F. Rigaut, P. Lena, G. Rousset, J. C. Fontanella and J. P. Gaffard: "Adaptive optics system tests at the ESO 3.6 m telescope," Proc. SPIE, **1542** (1991) 308-318.
- 2) K. E. Oughstun, J. M. Spinhirne and D. Anafi: "Intracavity adaptive optics. 4; Compensation of theory and experiment," Appl. Opt., **23** (1984) 1529-1541.
- 3) 一ノ瀬祐治, 妹尾 誠, 洲崎保司: "レーザ測距における大気ゆらぎの影響と補償光学系の効果", 第 18 回レーザセンシングシンポジウム (1997) pp. 113-114.
- 4) J. W. Hardy, J. E. Lefebvre and C. L. Koliopoulos: "Real-time atmospheric compensation," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 360-369.
- 5) 田中 濟, 野口 猛: "シャックハルトマン鏡面測定装置のデータ処理", 国立天文台技報, **2** (1994) 431-446.
- 6) 高見英樹: "アダプティブ光学による光ビーム制御の現状 (天文学への応用)", 精密工学会誌, **60** (1994) 1091-1096.
- 7) L. Cuellar, P. Johnson and D. G. Sander: "Performance tests of a 1500 degree-freedom adaptive optics system for atmospheric compensation," Proc. SPIE, **1542** (1991) 468-476.
- 8) 一ノ瀬祐治, 上野雄一郎: "補償光学系における高速波面制御アルゴリズム", 光学, **25** (1996) 421-427.
- 9) 一ノ瀬祐治, 妹尾 誠, 大津 誠: "補償光学用形状可変鏡の試作", 第 44 回応物講演会予稿集, 30aPA2 (1997).
- 10) R. K. Tyson: *Principle of Adaptive Optics* (Academic Press, San Diego, 1991) pp. 240-255.