

研究

マルチディザー方式補償光学系における波面制御性の 解析およびシミュレーション結果

一ノ瀬祐治・川端 正弘・道口 由博

(株)日立製作所エネルギー研究所 〒316 日立市森山町 1168

(1992年5月22日受付, 1992年7月23日受理)

Analytical and Computer Simulation Results on Wavefront Controllability in a Multidither Adaptive Optical System

Yuuji ICHINOSE, Masahiro KAWABATA and Yoshihiro MICHIGUCHI

Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1168, Moriyama-cho, Hitachi 316

(Received May 22, 1992; Accepted July 23, 1992)

Adaptive optics can overcome the deleterious effects of phase distortions experienced by optical beams propagating through distorting optics or via a turbulent atmosphere. A multidither adaptive optical system indirectly detects phase distortions using phase modulation, which is applied to plural elements of a deformable mirror at individual element frequencies. Analytical and computer simulation results are as follows. 1) Each modulation signal detected at the focal point is proportional to the difference in the laser phase, modulated at the same frequency, from the average of the wavefront. 2) The control system has the same number of elements as separate control loops which minimizes the amplitude of the phase modulation signal. 3) The system always unifies the wavefront to the average of the phase distortions. 4) The correction of phase distortions is not influenced by coupled vibrations between the actuators in the deformable mirror.

1. はじめに

補償光学技術はレーザーあるいは光波の波面歪を補正する手法であり, 1970年代より盛んに研究されてきた¹⁻³⁾。波面歪の原因としては, レーザー自体の歪, 光学系の歪および大気の揺らぎによる屈折率分布等がある。この波面歪を検出し, その位相共役波面を発生させることにより伝搬後の波面歪を補正するのが補償光学系である。補償光学系を天体望遠鏡や高出力レーザー発振器に適用して, 分解能の向上⁴⁾ やビームの歪補正⁵⁾ が可能なことが報告されている。本論文で述べるマルチディザー方式では, 位相変調したビームの信号強度から間接的に波面を検出する。この他の波面検出法には, 波面を直接検出するハルトマン検出方式⁶⁾, シェアリング干渉

方式⁷⁾ 等がある。マルチディザー方式は直接検出方式に比べ, 波面検出用の光学系が単素子の光検出器のみと単純であり, 位相共役波面を生成するための演算が不要で応答性に優れている。その反面, 位相変調のために高応答の形状可変鏡が必要であり, 波面自体を検出し制御する他方式と大きく異なる制御系となっている。

これまでのマルチディザー方式の研究において, 位相変調信号と波面の関係が明らかにされ, 各々の信号ごとに独立に制御する手法が開発された⁸⁾。またシステム雑音および位相変調時の振幅に対する補償効率なども明らかにされている²⁾。さらに 18 分割型形状可変鏡を用いた実験装置において, 波面制御が達成されたことが報告されている^{2,9)}。上述の研究においては, 集光点の強度により波面制御の検証および解析がされていた。これは

波面およびビーム形状の解析および計測が困難であることが大きな理由であった。本研究では、ビームの2次元伝搬計算から焦点位置での位相変調信号の強度分布を明らかにするとともに制御系の応答特性について検討した。また、形状可変鏡で生じる連成振動の影響についても明らかにした。以下、その内容について報告する。

2. 位相変調信号と波面の関係

2.1 マルチディザー方式補償光学系の波面検出法

マルチディザー方式は、送信レーザービームの微小領域ごとに個別の周波数で位相変調し、ビームの集光点の光強度から各周波数成分を分離検出し、間接的に波面を検出するものである。以下、Fig. 1 を用いてマルチディザー方式補償光学系の原理を説明する。

いま、角周波数 $\omega_m (m=1, 2, \dots, N)$ で位相変調された N 個のレーザービームを考える。その振幅 U_m は次式で与えられる。

$$U_m = U_0 A_m \exp(j\phi_m) \quad (1)$$

ただし、 U_0 ：送信時の振幅

A_m ： m 番目のレーザーの振幅分布係数

ϕ_m ： $\phi_m + \psi \sin \omega_m t$

ϕ_m ： m 番目のレーザー位相

ψ ：位相変調時の振幅

N 個のレーザービームの焦点の強度 I_p は、すべてのビームが一点に集光されるとすれば次式の干渉計算より求まる。

$$\begin{aligned} I_p &= \left| \sum_{m=1}^N U_m \right|^2 \\ &= U_0^2 \left\{ \sum_{m=1}^N A_m^2 + \sum_{m=1}^N \sum_{k=1, k \neq m}^N A_m A_k \cos(\phi_m - \phi_k) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

(2)式を(3)式で示すベッセル級数展開を用いて各成分

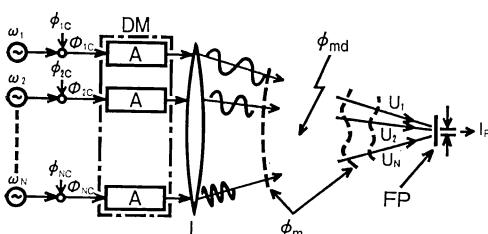


Fig. 1 Schematic of laser phase modulation in multidither adaptive optics. Each laser phase is modulated by the deformable mirror in which each actuator is supplied with a different frequency signal. DM, deformable mirror; A, actuator; L, lens; ϕ_{md} , phase distortions; ϕ_m , wavefront; FP, focal plane; I_p , intensity of laser at focal point.

ごとに分けると、

$$\cos \{\psi \sin \omega t\} = J_0 + 2J_2 \cos 2\omega t \quad (3)$$

$$I_p = I_{DC} + I_\omega + I_{2\omega} + I_H \quad (4)$$

$$I_{DC} = U_0^2 \left\{ \sum_{m=1}^N A_m^2 + J_0^2 \sum_{m=1}^N \sum_{k=1, k \neq m}^N A_m A_k \cos(\phi_m - \phi_k) \right\} \quad (5)$$

$$I_\omega = -4U_0^2 J_0 J_1 \sum_{m=1}^N \sum_{k=1, k \neq m}^N A_m A_k \sin(\phi_m - \phi_k) \cdot \sin \omega_m t \quad (6)$$

$$I_{2\omega} = 4U_0^2 J_0 J_1 \sum_{m=1}^N \sum_{k=1, k \neq m}^N A_m A_k \cos(\phi_m - \phi_k) \cdot \cos 2\omega_m t \quad (7)$$

ただし、 I_{DC} ：直流成分

I_ω ：位相変調成分

$I_{2\omega}$ ：2倍の位相変調周波数成分

I_H ：位相変調の調波成分

J_0, J_1, J_2 ：ベッセル関数（引数 ψ ）

が得られる。ベッセル関数の引数 ψ （位相変調振幅）が小さいほどレーザーの直流成分が大きくなるため、 ψ は検出可能な範囲で小さな値に設定される。これに対し引数 ψ が $\pi/9$ のときでも J_3 以降の値は J_0 の 0.1% 以下であるため、(3)式のように高次の展開項を無視しても問題はない。(6)式は、角周波数 ω_m で位相変調された成分を示し、このそれぞれの振幅 $I_\omega(m)$ は次式となる。

$$I_\omega(m) = -4U_0^2 J_0 J_1 A_m \sum_{k=1, k \neq m}^N A_k \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (8)$$

各ビーム強度が等しくかつ位相差が小さい場合、すなわち、

$$A_m = A, \quad m = 1, 2, \dots, N$$

$$\sin(\phi_m - \phi_k) = (\phi_m - \phi_k)$$

のとき、(8)式は次式のように線形化できる。

$$I_\omega(m) = -K_\omega \left\{ \phi_m - 1/(N-1) \sum_{k=1, k \neq m}^N \phi_k \right\} \quad (9)$$

ただし、 $K_\omega = 4U_0^2 J_0 J_1 A^2 (N-1)$

(9)式の第1項は、位相変調された m 番目のレーザービームの位相であり、第2項は他のレーザー位相の平均値を表す。したがって各位相変調成分の振幅 $I_\omega(m)$ を検出すれば、レーザー波面を計測できる。また(6)、(7)式を比較するとわかるように、 I_ω はレーザーの位相差 $(\phi_m - \phi_k)$ の正弦関数に比例し、 $I_{2\omega}$ は余弦関数に

比例するため $I_{2\omega}$ のみを検出することによっても波面の計測は可能である。

2.2 ビームの回折と位相変調信号

上述の光強度 I_p の計算 ((2)式) では、ビームの回折の影響は考慮していない。実際の焦点像は、ビームの回折より強度分布を持つ。そこでレーザービームのレンズ焦点像をキルヒホフの回折積分より求め、(4)～(7)式の各信号と比較した。その解析条件を **Table 1** に示す。レーザービーム ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$, $\phi 20 \text{ mm}$) を4分割型形状可変鏡で位相変調し、レンズ ($f=3 \text{ m}$) での焦点像を計算した。ここで、位相変調振幅 ψ を 20° 、分割されたレーザービームの位相分布を $(45, 0, 0, 0) [^\circ]$ として計算した。

Fig. 2 に焦点上の受光面積と各位相変調信号の関係を示す。各信号は受光面積に比例するため、各面積時の直流成分 I_{DC} で規格化した。また面積は、回折限界の面積 (約 12 mm^2) で規格化している。(5)～(7)式から、

$$I_{DC}=U_0^2\{4A^2+J_0A^2\cdot12\cos(45)\} \quad (10)$$

$$I_\omega=-4U_0^2J_0J_1A^2\cdot3\sin(45) \quad (11)$$

$$I_{2\omega}=4U_0^2J_0J_2A^2\cdot3\cos(45) \quad (12)$$

$$I_\omega/I_{DC}=0.104, I_{2\omega}/I_{DC}=0.0091 \quad (13)$$

が得られる。(13)式と **Fig. 2** の結果を比較すると、受光面積が1以下では両者はほぼ一致するが、面積が大きくなると I_ω と $I_{2\omega}$ の相対強度は低下する。この原因は

Table 1 Parameters of multidither adaptive optical system.

Laser wavelength	10.6 μm
Beam diameter	20 mm
Number of divided deformable mirrors	4
Mirror size	$1 \times 1 \text{ cm}$
Focal length of lens	3 m
Lens aperture	3 cm
Peak magnitude of phase modulation	20°
Phase distortion ($\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$)	(45, 0, 0, 0)

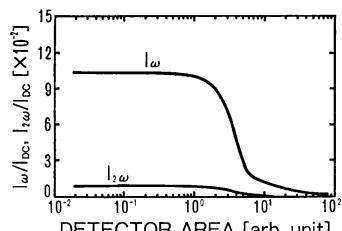


Fig. 2 Phase modulation signals vs area of photo detector. The detector area is normalized by the area within the diffraction limit.

焦点面上での波面は回折限界内ではほぼ一定であるのに対し、その外側では同一周波数で異なる位相成分が存在し振幅を打消し合うためである。また、 I_ω と $I_{2\omega}$ の相対強度はほぼ受光面積に逆比例して低下することを計算で確認した。そして I_ω と $I_{2\omega}$ の相対強度は、(13)式の $1/10$ 程度で飽和する。なお、**Fig. 2** で受光面積が 10 以上の領域で相対強度がさらに低下しているのは、焦点像の計算メッシュ数を一定で計算しているため、受光面積が大きくなると誤差が生じるためである。

以上の検討により、(5)～(7)式で示されるレーザー位相分布 (波面) と位相変調信号の関係は、光学系の回折限界以内の領域で成立することがわかる。また、焦点からの反射波を用いて制御するマルチディザー方式補償光学系では、位相変調信号の強度は解析値の $1/10$ 程度に見積もればよいことがわかる。

3. シミュレーションによる制御特性の検討

3.1 計算モデル

Fig. 3 にマルチディザー方式補償光学系を、**Table 2** に伝達関数を示す。 $\phi 60 \text{ mm}$ の CO_2 レーザービーム ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) は、9分割型形状可変鏡で位相変調と位相制御が実施される。そのビームはレンズで焦点面上に集光され、その反射波を光検出器で検出する。波面制御

Table 2 Transfer function of simulation model.

Deformable mirror	$A(s)=1/(s/\sigma+1)$ $\sigma=400\pi$
Synchronous detector	$D(s)=1/(\alpha_4\omega^4+\alpha_3\omega^3+\alpha_2\omega^2+\alpha_1\omega+\alpha_0)$ $\omega=s/200\pi$, low-pass-filter
Controller	$C(s)=k_p/(s/2\pi f_c)$ or $=k_1/s$

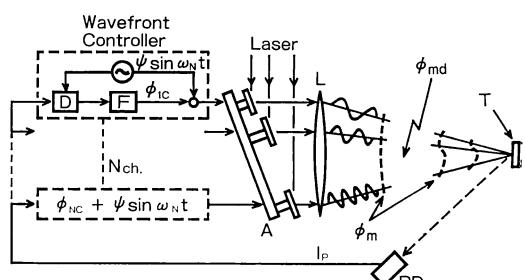


Fig. 3 Simulation model of multidither adaptive optics. CO_2 laser, 1 W, $\phi 60 \text{ mm}$; A, deformable mirror with 9 segments, segment size = $22 \times 22 \text{ mm}$; F, controller; D, synchronous detector; L, lens, $f=1 \text{ m}$; PD, photo detector; T, target; phase modulation, $\psi=20^\circ$, $f_0=3.8 \text{ kHz}$, $\Delta f=0.5 \text{ kHz}$.

装置は分割数と同じ 9 ch 構成であり、同期検波器で各周波数成分ごとに分離検出し、コントローラで位相変調信号よりミラー位置（レーザー位相）を決定する。シミュレーションでは、きざみ幅 $5 \mu\text{s}$ ごとにビームの伝搬計算および系の応答を計算している。以下、制御系の応答性および形状可変鏡の連成振動の影響について、シミュレーションにより検討した。

3.2 制御法と伝達関数

2.1 節で、位相変調信号とレーザー位相の関係は、(8)式で表されることを示した。ここでもう一度(8)式を示す。

$$I_o(m) = -4U_0^2 J_0 J_1 A_m \sum_{k=1}^N A_k \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (8)$$

波面が揃う条件は、

$$\phi_m - \phi_k = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (14)$$

であり、このとき(8)式の I_o はゼロとなる。したがって、位相変調したビームごとに Fig. 4 に示す I_o をゼロにする制御系を構成すれば良い。ここで制御位相 ϕ_{mc} は、

$$\phi_{mc} = -F \cdot A \cdot k_o \cdot I_o(m) \quad (15)$$

とすれば良い。なお、レーザー位相 ϕ_m は、制御位相 ϕ_{mc} と外乱位相 ϕ_{md} より次式で表される。

$$\phi_m = \phi_{mc} - \phi_{md} \quad (16)$$

線形近似した(9)式と(15)式より、 ϕ_{mc} について解けば、

$$\phi_{mc} = kFAD/(1+kKAD) \left\{ \phi_{md} + 1/(N-1) \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^N \phi_k \right\} \quad (17)$$

が得られる。これが単一の制御系の伝達関数である。この結果より、全体の制御系における伝達関数は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\phi_c = G \cdot B \cdot \phi_d \quad (18)$$

ただし、

$$G = \frac{kFAD}{(N-1)[1 + \{N/(N-1)\} kFAD]} \quad (19)$$

$$\phi_d = [\phi_{1d}, \phi_{2d}, \phi_{3d}, \dots, \phi_{Nd}]$$

$$\phi_c = [\phi_{1c}, \phi_{2c}, \phi_{3c}, \dots, \phi_{Nc}]$$

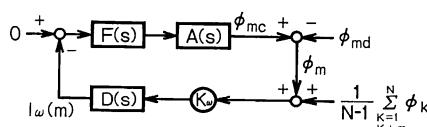


Fig. 4 Basic servo system for m -th loop. $F(s)$, $A(s)$, $D(s)$, transfer functions of controller, deformable mirror and synchronous detector, respectively; k_o , photo detector gain.

$$B = \begin{vmatrix} (N-1) & -1 & & & & & \\ -1 & & \ddots & & & & \\ \vdots & & (N-1) & & & & \\ \vdots & & & & & -1 & \\ -1 & \cdots & \cdots & -1 & (N-1) & & \end{vmatrix}$$

$$K = K_s \cdot K_o$$

K_s : 光検出器ゲイン

$F(s)$: 制御器の伝達関数

$A(s)$: 形状可変鏡の伝達関数

$D(s)$: 同期検波器の伝達関数

(19)式において N が十分大きければ、単一の制御系の伝達関数(17)式と極配置は一致する。これは単一の制御系で安定であれば、全体の系も安定であることを示している。

上述の線形近似により求めた伝達関数を、シミュレーションにより評価した。Fig. 5 にシミュレーションによるステップ応答時の結果と伝達関数(19)式より求めた安定限界を示す。ここで制御器の伝達関数は(20)式で示す一次遅れ系とした。

$$F(s) = k_p / (s/2\pi f_c + 1) \quad (20)$$

Fig. 5 で○は安定、●は不安定のシミュレーション結果を示しており、安定性の変化する境界と(19)式より求めた安定限界はよく一致しており、(19)式の伝達関数で制御系を評価できることを示している。

3.3 波面歪に対する応答

波面が揃うこととは上述したように各レーザーの位相差がゼロとなることであり、位相の絶対値は問題ではない。すると発生した波面歪に対して、無限の解（制御位相）が存在する。そこで本制御系において、その整定値について検討する。制御器の伝達関数は解析を容易にするため、積分制御 ($F(s) = 1/s$) とする。外乱位相 ϕ_d のステップ変化に対する制御位相 ϕ_c は、(19)式より最終

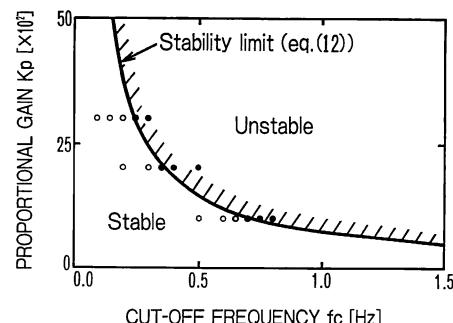


Fig. 5 Evaluation of stability in multidither adaptive optics. k_p and f_c are parameters of $F(s)$, $F(s) = k_p / (s + 1/2\pi f_c)$. ○ and ● are stable and unstable simulation results, respectively.

値定理を用いて次式となる。

$$\phi_c = 1/N \cdot \mathbf{B} \cdot \phi_d \quad (21)$$

したがってレーザー波面は、

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_c - \phi_d \\ &= 1/N \cdot \mathbf{B} \cdot \phi_d - \phi_d \\ &= 1/N \sum_{m=1}^N \phi_{md} \cdot \mathbf{I} \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、

$$\mathbf{I} = [1, 1, \dots, 1]$$

となる。 (22)式の右辺は外乱位相 ϕ_d の平均値であり、本制御系では常に波面歪に対してその平均値に波面を揃えるように制御される。

Fig. 6 にシミュレーション結果を示す。 $t=25\text{ ms}$ 時に、平均値 -30° の外乱を与えたときの光強度とレーザー位相の応答であるが、各位相は平均値 (30°) に収束しその結果光強度が回復している。また **Fig. 7** には、制御時の焦点像を示す。これからも波面歪により乱された焦点像が、波面制御により補正されているのがわかる。なお、この光学系における回折限界は約 0.4 mm である。

3.4 形状可変鏡の連成振動の影響

マルチディザイナー方式では、形状可変鏡の複数のアクチュエータを個々に駆動することにより、レーザーを位相変調する。このときアクチュエータの振動が他のミラーに連成し、位相変調信号に連成した領域のレーザー位相の情報が重畳され強度が変化する。このような連成振動の発生が波面の制御に与える影響を調べた。

Fig. 8 は、9分割型形状可変鏡においてミラー1に

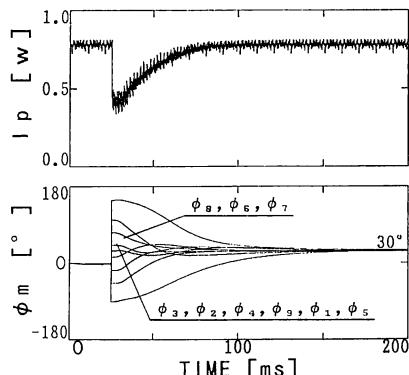


Fig. 6 Simulation results of step response. Phase distortions (ϕ_{md}) occur at 25 ms , where $\phi_{md} = [-30, 45, 90, 15, -45, -105, -75, -15]$, $\phi_{md} = -30^\circ$. The final converged laser power I_p is achieved 100 ms after distortions occur. Wavefront ϕ_m is corrected by the average value of the phase distortions.

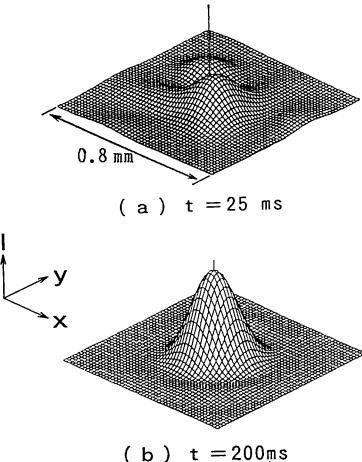


Fig. 7 Simulation results of beam profile. (a) Before correction, (b) after correction. Diffraction limit of the optics is about 0.4 mm .

ミラー2の連成振動が生じた場合のシミュレーション結果である。このときミラー1から送信されるレーザー位相は次式となる。

$$\phi_1 = \phi_{1c} + \phi \sin \omega_1 t + k \phi \sin \omega_2 t \quad (23)$$

ただし、 k ：連成係数 ($=0.5$)

$t=25\text{ ms}$ で外乱 $\phi_{1d}=90^\circ$ が発生すると、対応するレーザー位相 ϕ_1 が変化するとともに、外乱位相 ϕ_d の平均値も変化するためこれにより他のレーザー位相 ($\phi_2 \sim \phi_9$) も変化する。各制御位相は対応する位相変調信号に比例しており、連成振動の影響で I_p (2) が大きくなるため、 $\phi_3 \sim \phi_9$ と異なる変化を ϕ_2 は示す。ここで連成振動

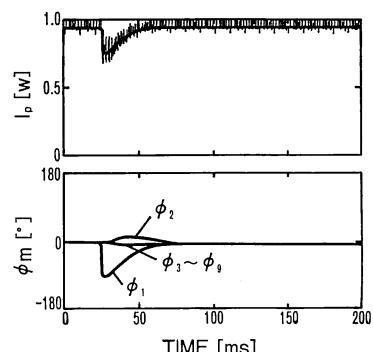


Fig. 8 Simulation results of step response with coupled vibrations in deformable mirror. Phase distortions (ϕ_{md}) occur at 25 ms , where $\phi_{md} = [90, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$. Responses of laser phases ($\phi_3 \sim \phi_9$) are identical, but that of ϕ_2 differs due to coupled vibrations. In this simulation, on modulation vibrations of actuator 2 are only transferred to actuator 1. Although such coupled vibrations occur, correction of phase distortions is achieved.

により増加した成分 $\Delta I_o(2)$ は、

$$\Delta I_o(2) \propto \left\{ \phi_1 - 1/8 \sum_{k=2}^9 \phi_k \right\} \quad (24)$$

とレーザー位相 ϕ_1 に比例する。一方、 ϕ_1 は $I_o(1)$ を最小化する独立した制御系により制御されるため、 ϕ_1 が制御されるのに伴って $\Delta I_o(2)$ も小さくなり、最終的には各レーザー位相は一定値に整定する。

Fig. 9 はすべてのミラー間で連成振動が発生する場合のシミュレーション結果である。このときの連成振動係数 k_{mk} を Table 3 に示す。各ミラーから送信されるレーザー位相 ϕ_m は次式で表される。

$$\phi_m = \phi_{md} + \psi \sum_{m=1}^9 \sum_{k=1 \atop k \neq m}^9 k_{mk} \sin \omega_k t \quad (25)$$

Fig. 9 より連成するミラーの増加や連成係数が大きくなってしまっても、波面の制御は可能なことがわかる。ただし、連成振動のない場合に比べ、連成時は安定限界値は低下

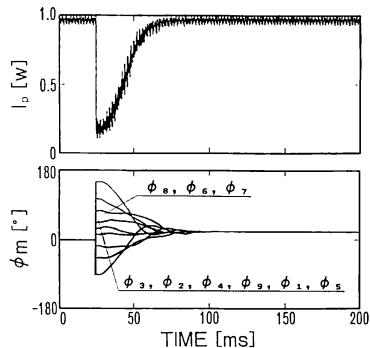


Fig. 9 Simulation results of step response with coupled vibrations in deformable mirror. Phase distortions (ϕ_{md}) occur at 25 ms, where $\phi_{md} = [-30, 45, 90, 15, -45, -105, -75, -15]$. Although on modulation the coupled vibrations between all actuators occur, correction of phase distortions is achieved.

Table 3 Coupled vibrations coefficient k_{mk} . Suffix m is the destination actuator number. Suffix k is the source actuator number.

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3
2	0.4	1.0	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1
3	0.2	0.3	1.0	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4
4	0.5	0.1	0.2	1.0	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2
5	0.3	0.4	0.5	0.1	1.0	0.2	0.3	0.4	0.5
6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	0.1	0.2	0.3
7	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	1.0	0.5	0.1
8	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	1.0	0.4
9	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	1.0

する。これは連成時には、位相変調信号が増加するとともに信号ごとのレーザー位相差に対するゲインが不均一になるためである。

4. ま と め

レーザービームの波面歪を補正するマルチディザー方式補償光学系の制御特性を計算機シミュレーションにより検討し以下の結論を得た。

- 1) 受光面積が回折限界内の領域では光強度の直流成分と位相変調信号の比は解析と一致するが、これ以上受光面積が大きくなると位相変調信号の割合が面積比で低下する。
- 2) 本制御系はビームの分割数を N とすれば、 N 個の独立した制御系として取扱え、求めた伝達関数はシミュレーション結果と一致する。
- 3) 形状可変鏡を領域ごとに異なる周波数で振動させ位相変調する場合、その振動が他の領域へ混入しても制御は可能である。

マルチディザー方式は単純な光学系で波面検出が可能という他の方式には見られない特徴を有しており、種々の光学装置への適用が期待できる。

文 献

- 1) J. E. Pearson, W. B. Bridges, T. A. Nussmeier and M. E. Pedinoff : "Coherent optical adaptive techniques: design and performance of an 18-element visible multidither COAT system," Appl. Opt., **15** (1976) 611-621.
- 2) T. R. O'Meara : "The multidither principle in adaptive optics," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 306-315.
- 3) R. R. Parenti : "Recent advances in adaptive optics methods and technology," Proc. SPIE, **1000** (1988) 101-109.
- 4) 家正則 : "能動光学と補償光学", 光技術コンタクト, **29** (1991) 10-18.
- 5) D. Anafi, J. M. Spinharne, R. H. Freeman and K. E. Oughstun : "Intracavity adaptive optics. 2: Tilt correction performance," Appl. Opt., **20** (1981) 1926-1932.
- 6) J. M. Feinleib : U.S. Patent 4,141,652.
- 7) J. W. Hardy, J. E. Lefebvre and C. L. Koliopoulos : "Real-time atmospheric compensation," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 360-369.
- 8) T. R. O'Meara : "Stability an N-loop ensemble reference phase control system," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 316-318.
- 9) S. A. Kokorowski, M. E. Pedinoff and J. E. Pearson : "Analytical, experimental, and computer simulation results on the interactive effects of speckle with multidither adaptive optics systems," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 333-344.
- 10) 一ノ瀬祐治, 川端正弘 : "マルチディザー方式補償光学系の応答解析", 計測自動制御学会学術講演会論文集 (1991) pp. 681-682.