



マルチディザイナ方式補償光学装置の波面制御実験

一ノ瀬祐治*・道口 由博*・角井 晴夫**・
杉井 正克***・嶺 康晴***・斎藤 英明***

* (株)日立製作所エネルギー研究所 〒319-12 日立市大みか町 7-2-1

** 同 日立工場 〒317 日立市幸町 3-1-1

*** 防衛庁技術研究本部第2研究所 〒154 東京都世田谷区池尻 1-2-24

(1993年4月8日受付, 1993年5月13日受理)

Experimental Results on Wavefront Controllability in the Multidither Adaptive Optical System

Yuuji ICHINOSE,* Yoshihiro MICHIGUCHI,* Haruo KADOI,**
Masakatsu SUGII,*** Yasuharu MINE*** and Hideaki SAITO***

* Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd., 7-2-1, Omika, Hitachi 319-12

** Hitachi Works, Hitachi Ltd., 3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi 317

*** 2nd Research Center, Technical R & D Institute, Japan Defense Agency,
1-2-24, Ikejiri, Setagaya-ku, Tokyo 154

(Received April 8, 1993; Accepted May 13, 1993)

A multidither adaptive optical system (MAOS) with a new type deformable mirror is described. The MAOS detects a laser wavefront using phase modulations, which are applied to plural segments of a deformable mirror at individual modulation frequencies. The deformable mirror has nine segments and each segment is driven by two different piezoelectric actuators. One is used in phase modulation and the other in wavefront control. The stroke range of the mirror is 30 μm and frequencies under 5 kHz are suitable for the modulation band. This control system has nine separate control loops, which work to minimize the phase modulation signal. Each signal is proportional to a sine function of the modulated laser phase. The cut-off frequency of the closed control loop is about 0.5 Hz. The laser intensity and beam profile measured at the focal point show that the distorted wavefront can be corrected.

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⁾が可能なが報告されている。波面検出法は、波面を直接検出するシェアリング干渉¹⁰⁾およびハルトマン検出¹¹⁾等の直

接検出方式と本報で述べるマルチディザイナ方式等の間接検出方式に大別される。

マルチディザイナ方式は、個々の領域ごとに異なる周波数で位相変調したレーザービームを送信し、その焦点面の信号強度から間接的に波面を検出するものである。マルチディザイナ方式は上述の直接検出方式に比べ、波面検出光学系が単一の光学素子のみと単純で、波面再構成用の演算が不要という利点がある。われわれは、これまでに、マルチディザイナ方式補償光学系のシミュレーションコードを開発し、位相変調信号と波面の関係を明らかにすると共に制御系の応答特性について検討した^{6,7)}。さらにこれらの解析結果をもとにマルチディザイナ方式補償

光学装置を開発し、波面制御が可能であることを確認した⁸⁾。

これまでのマルチディザイナ方式の研究において、18分割型形状可変鏡を用いた実験装置で波面制御が達成されたことが報告されている^{2,9)}。この実験ではアルゴンレーザー (波長 0.488 μm) を使用し、ビーム強度の観測結果から波面制御を確認している。これに対し今回開発した補償光学装置は、波長が20倍以上長いレーザー (10.6 μm) を制御対象としている。ミラー変形の長ストローク化に対応するため、各分割鏡を2種のアクチュエータで駆動する9分割型形状可変鏡を開発した。波面制御実験では、ビーム強度だけでなくビームプロファイルを計測し、その制御性について検討した。さらに位相変調信号と波面の関係および制御系の応答周波数を測定し、設計および解析値と比較検討した。以下、その内容について報告する。

2. 補償光学装置の概要

2.1 システム構成および動作

Fig. 1 にマルチディザイナ方式補償光学装置の構成を、Table 1 にその仕様を示す。φ58 mm の CO₂ レーザービーム (λ=10.6 μm) は、9分割型形状可変鏡で各分割鏡ごとに異なる周波数で位相変調 (振幅 λ/20) され、ミラー M3、レンズを介して集光される。焦点位置に置かれたピンホールを通過した光の強度には、9個の位相変調信号が含まれており、その振幅 I_m は、各レーザー位相 ϕ_m と次式の関係が成立する⁷⁾。

$$I_m = k_\omega A_m \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^9 A_k \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (1)$$

ただし、

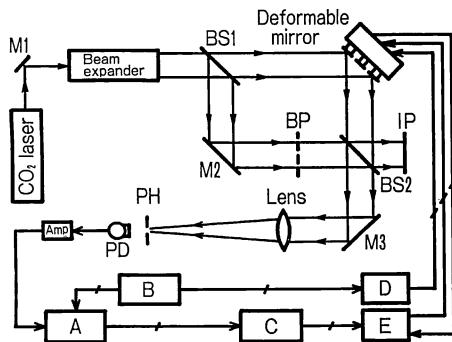


Fig. 1 Diagram of experimental apparatus. PH, pinhole; M, mirror; BS, beam splitter; BP, beam stop; IP, image plate; A, 9 synchronous detectors; B, 9 oscillators; C, personal computer; D, driver for dither; E, driver for control.

Table 1 Specifications of the multidither adaptive optical system.

| | |
|---------------------------------|----------|
| Laser power | 3 W |
| Laser wavelength | 10.6 μm |
| Beam diameter | 20 mm |
| Segment mirror numbers | 9 |
| Mirror size | 22×31 mm |
| Mirror stroke | 30 μm |
| Focal length of lens | 1000 mm |
| Pinhole diameter | 100 μm |
| Photo detector sensitivity | 1700 V/W |
| Synchronous detector linearity | 5% |
| Personal computer sampling time | 20 ms |

k_ω : 定数

A_m : m 番目のミラーからのレーザーの強度比
波面が揃うとき各レーザー位相差 ($\phi_m - \phi_k$) はゼロとなるため、(1)式の関係から位相変調信号の振幅 I_m をゼロとするように形状可変鏡を制御すれば良いことがわかる。

検出した光強度に含まれる9個の位相変調信号は各同期検波器 (9 ch) で分離検出され、パソコンにより形状可変鏡の操作量を決定する。形状可変鏡は後述するように位相変調と制御を個別のアクチュエータで駆動するため、パソコン出力は制御用に、発信器出力は位相変調用アクチュエータに入力される。その他 Fig. 1 には、形状可変鏡で制御した波面を観測するための干渉計 (BS1, M2, M3) がある。また図には示していないが、焦点像をビームプロファイルモニターにて観測している。

2.2 形状可変鏡の構造

Fig. 2 に形状可変鏡の外観を示す。図に示すように3×3配列の9分割鏡より構成されており、45°入射として使用するため、各ミラー寸法は22×31 mmとなっている。変調信号と制御信号を加算した信号でアクチュエータを駆動すれば、ミラーごとに一つのアクチュエータで形状可変鏡を構成できる。しかしアクチュエータとして用いるピエゾは変位の増加にともない傾くため、その補正機構が必要であり、以下の対策を図るため Fig. 3 に示す2ピエゾ駆動方式を採用した。

- (1) 軸受部の摩擦低減
- (2) 位相変調時の負荷重量の低減
- (3) 最大電源容量の低減

これにより当初開発した1ピエゾ駆動方式に比べ、応答周波数を3 kHz から5 kHzへ高速化でき、軸受部のメ

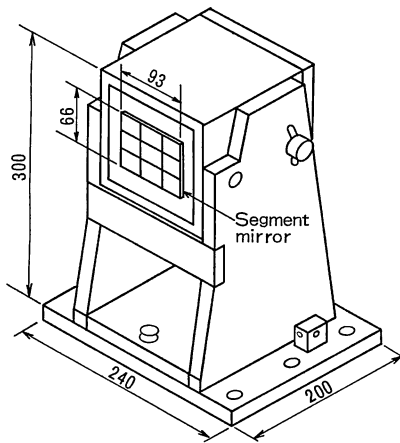


Fig. 2 Deformable mirror schematic drawing. The mirror has nine segments, which size is 22×31 mm.

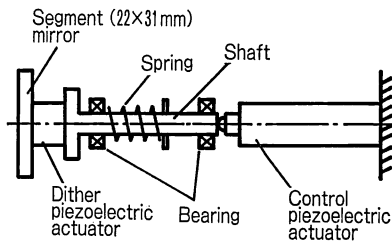


Fig. 3 An actuator unit of the deformable mirror. Dither piezoelectric actuator: sensitivity = $0.07 \mu\text{m}/\text{V}$, resonance frequency = 150 kHz . Control piezoelectric actuator: sensitivity = $0.3 \mu\text{m}/\text{V}$, resonance frequency = 16 kHz .

メンテナンス間隔を3倍以上長くすることができた。

Fig. 3において、ミラーに直結したピエゾは位相変調用であり振幅 $1 \mu\text{m}$ 程度で高周波振動する。姿勢軸を介して接続されたピエゾが制御用でありレーザー波長の2倍以上の駆動量 ($30 \mu\text{m}$) を持つ。姿勢軸を採用したことにより、制御用ピエゾの駆動範囲における最大傾きを $20 \mu\text{rad}$ 以下に抑えた。なお、姿勢軸と制御用ピエゾはスプリング力により接続されている。また制御用ピエゾには変位センサー付きピエゾを採用し、ヒステリシス特性をフィードバックループにより補償している。

3. 実験結果および検討

3.1 形状可変鏡の変位特性

マルチディザー方式では形状可変鏡を用いて波面制御と同時に位相変調を行う。その変調周波数は分割鏡ごとに割付ける必要があるため、補償光学の他の方式に比べ高い周波数応答が形状可変鏡には要求される。Fig. 4

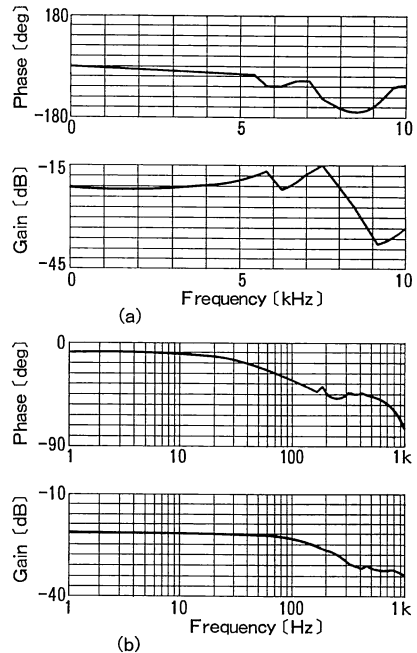


Fig. 4 Deformable mirror frequency responses for dither and control actuator. (a) Dither actuator, the drive voltage to the actuator is 5.0 Vrms , giving a $0.49 \mu\text{m}$ peak expansion. The resonances occur at 5.8 and 7.5 kHz . (b) Phase control actuator, the drive voltage to the actuator is 1.0 Vrms , giving a $0.42 \mu\text{m}$ peak expansion. The cut-off frequency is about 150 Hz .

(a)に変調用ピエゾ駆動時のミラー変位の周波数特性を示す。 5.8 kHz および 7.5 kHz 付近に共振点が存在している。図から 5 kHz までの帯域が、位相変調周波数として利用できることがわかる。

Fig. 4(b)に制御用ピエゾ駆動時のミラー変位の周波数特性を示す。応答周波数は約 150 Hz であり、変調用ピエゾの特性と大きく異なる原因は、制御用ピエゾの駆動系には 200 Hz の応答周波数を持つヒステリシス補償ループが存在するためである。なお制御用ピエゾの変位幅 $20 \mu\text{m}$ の立上り時間は、約 3.3 ms であった。

3.2 レーザー位相と位相変調信号の関係

位相変調信号の振幅 I_m と各レーザー位相 ϕ_m には(1)式の関係が成立することは既に述べた。ここでもう一度(1)式を示す。

$$I_m = k_0 A_m \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^9 A_k \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (1)$$

ただし、

k_0 : 定数

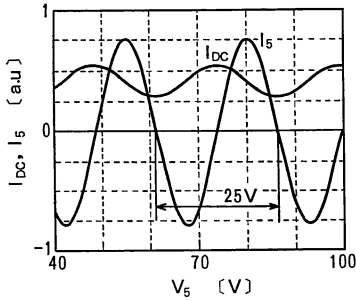


Fig. 5 Direct current component I_{DC} and phase modulation signal I_5 vs the drive voltage V_5 of phase control actuator No. 5. The V_5 is identical to the laser phase reflected by segment mirror No. 5. The I_{DC} is proportional to a cosine function of V_5 and I_5 , to a sine function.

A_m : m 番目のミラーからのレーザーの強度比
これに対し光強度の直流成分は、次式となる。

$$I_{DC} = I_0 + k_0 \sum_{m=1}^9 \sum_{k \neq m}^9 A_m A_k \cos(\phi_m - \phi_k) \quad (2)$$

ただし、 I_0, k_0 は定数。

(1), (2)式より振幅 I_m はレーザー位相差 $(\phi_m - \phi_k)$ の正弦関数に、直流成分 I_{DC} はレーザー位相差の余弦関数に比例することがわかる。これらの関係を実験装置により確認した結果が、**Fig. 5** である。**Fig. 5** はミラー No. 5 の制御用ピエゾを駆動したときの I_5 と I_{DC} を測定したものである。ミラー駆動電圧はミラーから反射されるレーザーの位相 (ϕ_5) に対応し、**Fig. 5** より(1), (2)式の関係が成立しているのが確認できる。また1周期の長さを算出すると、制御用ピエゾの変位係数 $0.3 \mu\text{m}/\text{V}$, 45° 反射、駆動電圧幅 25 V であることから、

$$0.3 \times 25 / \sin 45 = 10.6 \mu\text{m} \quad (3)$$

となり、これは CO_2 レーザー波長に一致している。

3.3 制御系の周波数応答

本制御系は **Fig. 6** に示す制御系が9個独立に存在するものとして取扱うことができる。**Fig. 6** に示す制御位相 ϕ_{mc} と外乱位相 ϕ_{md} の差がレーザー位相 ϕ_m であり、その伝達関数は次式で与えられる⁶⁾。

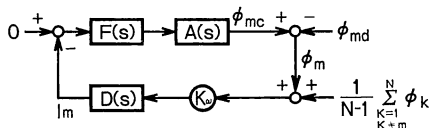


Fig. 6 Basic servo system for m -th loop. $F(s)$, $A(s)$, $D(s)$, are transfer functions of controller, deformable mirror and synchronous detector, respectively; k_0 is photo detector gain.

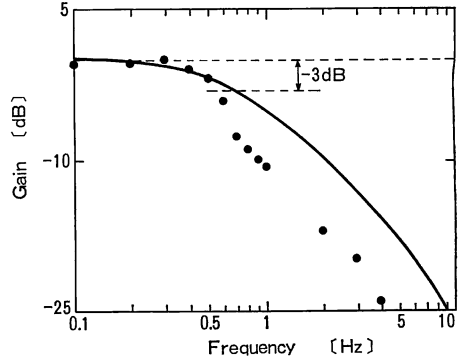


Fig. 7 Closed loop frequency response. A disturbance signal is added to the drive voltage of phase control actuator No. 5. The amplitude is 0.8 V . The solid line is theoretical and the dots are measured values. The cut-off frequency is about 0.5 Hz .

$$G(s) = kAFD / (1 + kAFD) \quad (4)$$

ただし、

k : 定数

A : 形状可変鏡の伝達関数 (制御用ピエゾ)

F : パソコンの伝達関数 (積分制御)

D : 同期検波器の伝達関数

Fig. 7 に制御系の周波数特性の測定結果 ● と(4)式より求めた解析値 (実線) を示す。なお、測定はミラー No. 5 の駆動電源の入力に外乱信号を挿入して行った。また同期検波器の伝達関数は、検波する周波数以外の成分を除去するために設けた2次 LPF (カットオフ周波数 10 Hz) の伝達関数で近似した。(4)式の伝達関数は制御系を線形近似して求めたものであり、アンプ等の伝達関数を定数として計算したことを考慮すると両者は比較的一致している。このことからマルチディザ方式補償光学系の伝達関数を(4)式として設計できることがわかる。

測定結果より、本制御系の応答周波数は約 0.5 Hz であった。マルチディザ方式補償光学系の応答周波数は、(4)式にある各伝達関数を変えれば向上できるが、その限界は位相変調の周波数間隔により制約がある。すなわち、系の応答周波数が周波数間隔を超えれば、位相変調信号に隣の変調成分が混入し正しい波面検出ができなくなるからである。そこでマルチディザ方式では位相変調帯域の確保が高速化の点では重要な課題となる。

3.4 レーザー波面制御結果

Fig. 8 に光強度のステップ応答を示す。各分割鏡の高さを不揃いにした状態から、時刻0で波面制御を開始

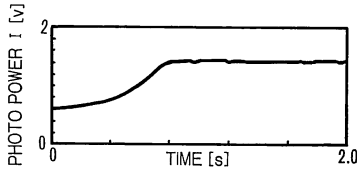


Fig. 8 Step response of photo power.

し、光強度の応答を測定した。その結果、波面制御により焦点の光強度が増加し、約 0.8 s で光強度は応答しているのがわかる。測定した制御系の応答周波数 0.5 Hz と比べ応答時間が約 2 倍遅いのは、光強度の応答ではすべてのミラーに外乱がある状態から制御を開始したため制御ループ間の干渉が生じたためである。ここで光学系の回折限界は約 400 μm であるのに対しピンホール径を 100 μm にしたのは、制御前後で大きな光強度変化が得られる他、回折限界以上の径では位相変調信号の SN 比が低下するためである⁷⁾。なお、制御前後の波面を、Fig. 1 に示した干渉計にて測定し、干渉縞が制御により揃うことを確認した⁸⁾。

Fig. 9 は制御前後の光検出器出力のパワースペクトルを測定したものである。位相変調周波数 f_m は次式で示す値に設定した。

$$f_m = f_0 + \Delta f \cdot m \quad (5)$$

ただし、

f_0 : ベース周波数 2450 Hz

Δf : 周波数間隔 100 Hz

m : ミラー No.

9 個の位相変調信号 I_m のスペクトルは制御により小さくなっているのがわかる。パソコンの AD 変換器の分解能およびパソコン演算時の切捨て誤差から、 I_m のスペクトルは -36 dBv が制御限界である。ところが制御

後のスペクトルにはこのレベル以上のものがあり、この原因はミラーの静的な傾きと位相変調ピエゾによる変調周波数と同期したミラー傾きの変動により、制御用ピエゾのストロークに関係しない成分が発生するためである。

Fig. 9 には I_m のスペクトル以外に多数のスペクトルが観測されるが、これらは位相変調周波数の整数倍の成分と高調波成分である。変調周波数の奇数倍の成分はレーザー位相差の正弦関数に比例し、偶数倍の成分はレーザー位相差の余弦関数に比例する。したがって、Fig. 9 の 5~7 kHz に存在する 2 倍周波数のスペクトルは、制御前に比べ制御後は大きくなっている。このように変調周波数の整数倍成分もレーザー位相差に比例するため、これらの信号により波面制御を実現することも可能である。ただし、整数倍成分は高次になるほど強度が低下し、また高調波成分のスペクトルと重なるために SN 比は悪くなる。

上述までの波面制御実験では形状可変鏡自身により波面歪を発生させたが、次に位相板により波面歪を発生させた場合の制御結果について述べる。位相板はゲルマニウムで作られており、その板厚を変え通過するレーザーに位相差を与えるものである。Fig. 10 に制御前後の焦点像の計測値と解析値を示す。3 種の位相板で図に示すような位相差 ($\lambda/2$, 0, $\lambda/4$) を与えた。図の (a), (c) は焦点像の計算結果であり、(b), (d) が計測値である。(a), (b) は制御前の焦点像であり波面歪によりビーム形状が崩れているのがわかる。これに対し制御後は (c), (d) に示すように収束されたビーム形状が得られている。制御によりビームのピーク値は約 2 倍に向上した。このように焦点像の観測結果からも良好な波面制御が達成されたことがわかる。また形状可変鏡の各分割鏡

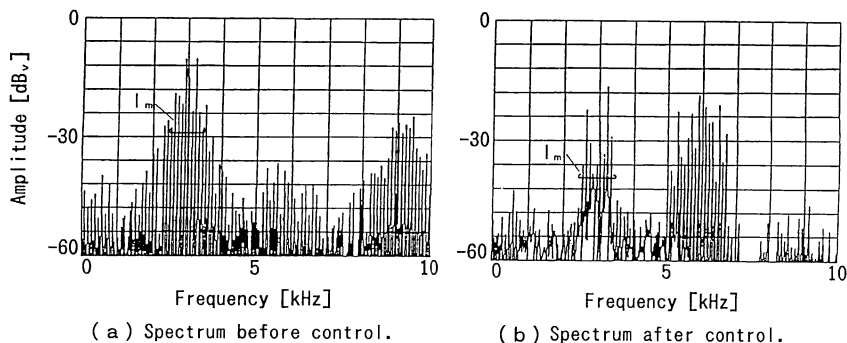


Fig. 9 Spectrum of laser intensity. Spectra (a) before and (b) after control. Dither frequency, $f_m = f_0 + \Delta f \cdot m$ ($f_0 = 2450$ Hz, $\Delta f = 100$ Hz). Phase modulation signals I_m become small due to control.

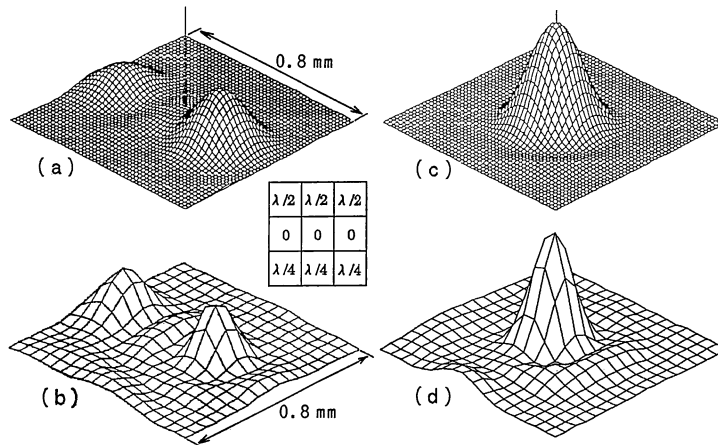


Fig. 10 Laser beam profiles at the focal point. (a) and (c) are calculated results. (b) and (d) are measured results. (a), (b) are beam profiles before control. Phase distortions on the nine segment deformable mirror are listed in the figure table. (c), (d) are beam profiles after control. Diffraction limit of the optics is about 0.4 mm.

の駆動方向に対する傾きをゼロとして計算したが、計算値と実測値がこのように良く一致しているのは、形状可変鏡の傾きを $20 \mu\text{rad}$ 以下に抑えることができたためである。

4. ま と め

送信するレーザービームに位相変調を与え、その信号強度から波面歪を検出するマルチディザー方式補償光学装置を開発し、その特性を評価し以下の結論を得た。

- 1) 9分割型形状可変鏡の各分割鏡を変調用と制御用の2種のピエゾで駆動する機構を採用し、ストローク長 $30 \mu\text{m}$ 、ミラーの最大傾き $20 \mu\text{rad}$ 以下、変調帯域 5kHz の性能を得た。
- 2) 本制御系は各位相変調信号を最小化制御ループが9個独立に存在する系として取扱え、その応答周波数は 0.5Hz であった。
- 3) 制御前後の光強度、波面の干渉縞およびビーム形状を測定した結果、波面歪の補正が達成できることを確認できた。

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ない特徴を有しており、種々の光学装置に適用することによりその性能を向上させることができる。

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. Spinhirne, R.H. Freeman and K.E. Oughstun: "Intracavity adaptive optics. 2: Tilt correction performance," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 1926-1932.
- 6) 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.
- 7) 一ノ瀬祐治, 川端正弘, 道口由博: "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及びシミュレーション結果," *光学*, **21** (1992) 714-719.
- 8) M. Sugii, H. Hara, Y. Ichinose, Y. Michiguchi, M. Kawabata, T. Kishi and H. Kadai: "Wavefront correction using a nine segment deformable mirror in a multidither optical system," *CLEO '92* (1992).
- 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) J.W. Hardy, J.E. Lefebvre and C.L. Koliopoulos: "Real-time atmospheric compensation," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 360-369.
- 11) J.M. Feinleib: U.S. Patent 4,141,652.