



イメージスタビライザによる光波面補償実験

早野 裕*・西川 淳**・高遠 徳尚***・家 正則***

* 東京大学理学部天文学教室 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16

** 郵政省通信総合研究所関東支所平磯宇宙環境センター 〒311-12 ひたちなか市磯崎町 3601

*** 国立天文台大型光学赤外線望遠鏡計画推進部 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

(1994年9月13日受付, 1994年11月18日受理)

The Wavefront Correction Experiment by Image Stabilizer

Yutaka HAYANO,* Jun NISHIKAWA,** Naruhisa TAKATO*** and Masanori IYE***

* Department of Astronomy, School of Science, University of Tokyo,
2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113

** Hiraiso Soral Terrestrial Research Center, Communications Research Laboratory,
Ministry of Posts and Telecommunications,
3601, Isozaki-cho, Hitachinaka 311-12

*** JNLT (SUBARU) Telescope Project Office, National Astronomical Observatory,
2-21-1, Osawa, Mitaka 181

(Received September 13, 1994; Accepted November 18, 1994)

We have developed a prototype image stabilizer system, which is the simplest system to compensate for the wavefront distortion caused by atmospheric turbulence. Evaluation tests and observations were made by using the 188 cm telescope at Okayama Astrophysical Observatory. We found that our system eliminates the wandering image motion of stars and the image size of stars in a long exposure time becomes smaller by nearly 20%. Assuming the air turbulence has the Kolmogorov spectrum, the result is consistent with the expected performance in compensating for the wave front tilt error. The system bandwidth is about 130 Hz for 2 magnitude stars at visual wavelength. Our system can be used for stars brighter than 4 magnitude at visual wavelength. Based upon this prototype system, we are constructing an improved system which can observe up to 10 magnitude stars at visual wavelength.

1. はじめに

地上から天体を観測する場合、地球大気のゆらぎによる影響を考慮しなくてはならない。可視光領域では、大気の温度分布の空間的・時間的な擾乱の影響が大きい。この影響で天体からの光の波面(同位相面)が乱されて絶えず変化するため、得られる天体像はぼやけてかつゆれ動いてしまい、完全な収差のない望遠鏡で観測しても望遠鏡口径でできる回折限界像を得ることはできない。天体の微細な空間構造の情報を得ることは、天体現象の理解の解明に対して大きな役割をもっている。故に、大気ゆらぎによる空間角度分解能の劣化は重大な問題である。

単独の恒星は無遠点にある点光源とみなせるので、大

気圏外に到達した波面は、わずかな宇宙空間物質の影響は受けるものの、ほとんど平面波とみなすことができる。この段階で無収差の望遠鏡で結像すると、その望遠鏡の開口の大きさに決まる回折限界像が得られる。ところが、大気中を通過して地上まで到達した波面は大気の屈折率ゆらぎの影響を受けて平面波から大きくずれている。乱れた波面はコヒーレンス長 r_0 (Fried's coherence length)¹⁾ とコヒーレンス時間 τ で特徴づけることができる。 r_0 は入射波面を局所的に見たときに波面位相誤差が約1ラジアン以内におさまっている波面の大きさで、 τ は r_0 の長さを乱流が通過する時間である。乱れた波面による恒星像は、望遠鏡の口径で決まる回折限界の情報を含んでいるものの、口径 r_0 の望遠鏡の回折限界程

度の広がりを持ち、タイムスケール τ で時々刻々と変化するのである。日本において可視光領域で r_0 は 10 cm 程度以下²⁾、 τ は 10 ms 程度以下であるので、恒星像は 1 秒角程度以上の大きさをもつことになる。

では、高空間角度分解能を達成するためにはどうしたらよいのか。最も直接的な解決法は邪魔な大気の外へ出て観測する、すなわち大気圏外に望遠鏡を持っていくことである。アメリカ合衆国のスペースシャトルによって地球周回軌道に運ばれた HST (hubble space telescope)³⁾ が代表例である。しかし、予算的技術的問題を解決するために甚大な投資を必要とする。第二の解決法は、元凶である大気ゆらぎの効果を補正する方法である。スペckル干渉法⁴⁾ に代表されるように天体像を検出した後に像処理によって補正を行う場合と、アダプティブオプティクス⁵⁾ や最先端の小口径光学天体干渉計⁶⁾ のように検出器の前に補正装置を置く場合とに分類できる。

1970 年代当初、アダプティブオプティクスシステムは人工衛星から地上を撮影する際に大気ゆらぎを補正するために開発されたが⁷⁾、近年はその技術が天文学に応用されはじめ、各国が競って研究開発を進めている。現在ではいくつかの研究開発グループが試験観測で像の改善に成功したり、天文学的成果をあげている⁸⁻¹²⁾。アダプティブオプティクスシステムは、望遠鏡に入射した時の乱された波面を測定する波面検出部分と、大気による擾乱を受ける前の波面の状態に戻るように実時間で補正をする波面補償部分と、それらを結合するコントロール部分とで構成される。波面のどの程度細かい凹凸まで考慮するかは r_0 の大きさに決定され、システムバンド幅は τ によって左右される。現段階では、波面を r_0 の大きさ以上に分割したシステムが数多く開発されている。また、球面収差や非点収差といった特定の波面収差のみを補償しているシステムもある¹³⁾。

さて、イメージスタビライザは波面の傾斜成分のみ、すなわち最も低次の波面補償を行う装置である。そうすることによって恒星像を小さくし、少しでも多くの天体の光を中心に集中させ観測効率をあげることが目的である。望遠鏡の開口面における全体的な波面傾斜は恒星像の位置を測定して求められ、その波面傾斜に応じて 1 枚の平面鏡の傾きを変化させることで波面補償が可能である。全体の波面誤差のなかでも最大の成分をもつ波面傾斜誤差を補償し除去することは重要な意味を持ち、複雑な波面補償を行うアダプティブオプティクスを行う場合においても大きな役割を果たす。なぜなら、波面傾斜誤差を除去することで、局所的な波面誤差を補償する可変

形鏡のストローク幅が小さくなるからである。また、波長の長い近赤外線領域では波面傾斜補償を行うだけで望遠鏡の回折限界近くまで到達できる。このように、波面傾斜補償を行うイメージスタビライザは重要である。そこで、イメージスタビライザのプロトタイプを試作して性能評価を行った。

2. イメージスタビライザの設計と製作

イメージスタビライザのプロトタイプ機は、国立天文台岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡のカセグレン焦点におけるアパーチャマスクング法による光開口合成実験^{14,15)}で、各開口間の干渉性を向上させるための前置き光学系として設計・製作した (Fig. 1)。

光学系を Fig. 2 に示す。望遠鏡のカセグレン焦点後方に置いたコリメータレンズで平行光束にし、コリメータレンズによってできる主鏡像の位置に波面傾斜を補償する平面鏡 (tip-tilt 鏡) を置く。この理由は、開口合成

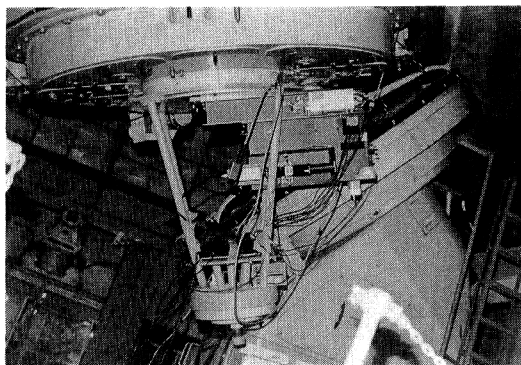
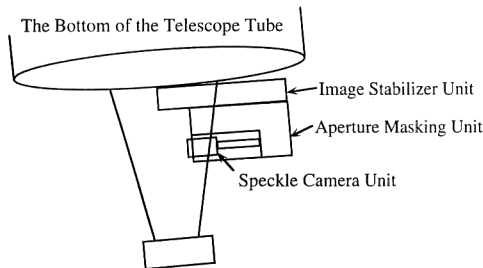


Fig. 1 The simple sketch (above) and the photograph (below) of image stabilizer system mounted at the Cassegrain focus of the 188 cm telescope, located at Okayama Astrophysical Observatory. The flat rectangular shape black box with silver case under the telescope tube is the image stabilizer unit, there are the aperture masking unit and speckle camera unit. A PZT controller, a video tape recorder and other instruments for measurement were set in a shielded room to prevent generating the air turbulence.

を行うためのいくつかの小さな開口を有するマスクが主鏡像位置に設置されるため、単純に波面傾斜補正のみを行うときには tip-tilt 鏡は光路中の任意の位置において構わない。主光束は再びカメラレンズでカセグレン焦点と同じ F 値で集光させ、アパーチャマスクユニット、スペックルカメラ光学系や CCD カメラなどの別の装置に送られる。波面傾斜検出は、tip-tilt 鏡の後方のコリメート光束中で光を分岐して 4 分割シリコンフォトダイオード上に結像し、直交した 2 対のフォトダイオードの出力信号の差で結像位置を求めて波面の傾きを検出する。ビームスプリッターの比は透過が 3 に対して反射が 1 のものを使用した。最初は 1 : 1 のビームスプリッターを使用していたが、イメージスタビライザの後ろに設置したアパーチャマスクカメラのスループットを優先させて、観測対象である 3 等級より明るい天体に対してイメージスタビライザが十分動作するように変更した。4 分割フォトダイオードは熱雑音を抑えるためにペルチエ

冷却器で約 -20°C に冷却されており、便宜上、南北と東西の方向の恒星像の位置変動を検出するように置かれている。対をなすフォトダイオードの差信号をその和信号によって規格化し、星の明るさの違いによる効果は除去している。規格化された差信号が常にゼロになるように南北と東西の方向それぞれ独立にフィードバック制御をして波面補償を行う (Fig. 2, Fig. 3)。 piezo アクチュエータを駆動する高電圧アンプの変換ゲインは、観測者が恒星像の位置変動の時間スペクトルを見ながら判断し調節した。

Tip-tilt 鏡の構造は Fig. 4 に示す。Tip-tilt 鏡セルの裏面に取り付けられた積層型 piezo アクチュエータと押しバネによって、波面傾斜検出器に対応するように南北と東西の直角 2 軸方向に鏡の傾きを変えることができる構造になっている。押しバネは piezo アクチュエータに引張り荷重がかからないために必要である。この tip-tilt 鏡は、最大ストロークが $15\mu\text{m}$ の piezo アクチュエー

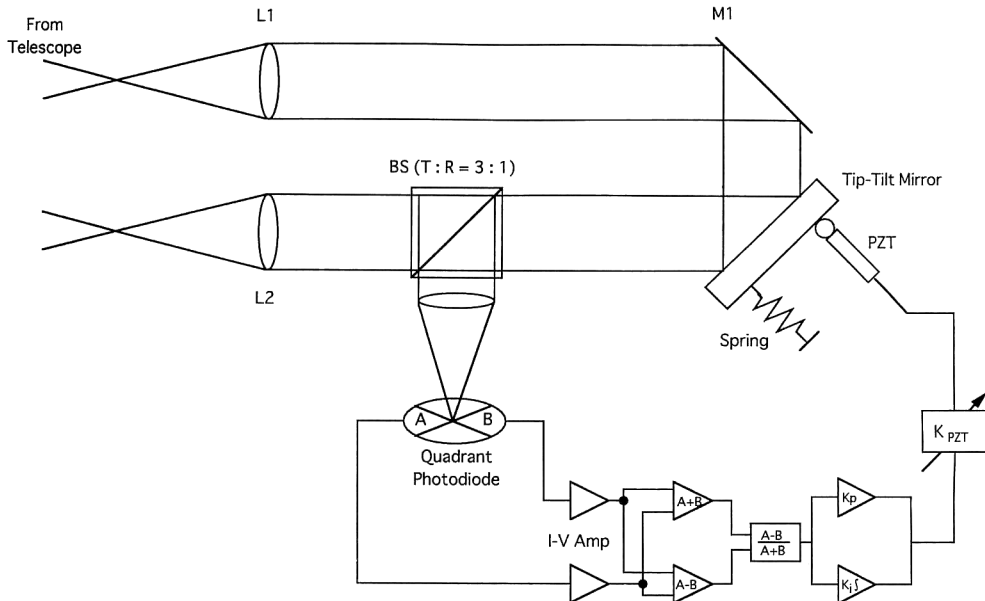


Fig. 2 A schematic layout of the optics and the mirror control system of the image stabilizer.

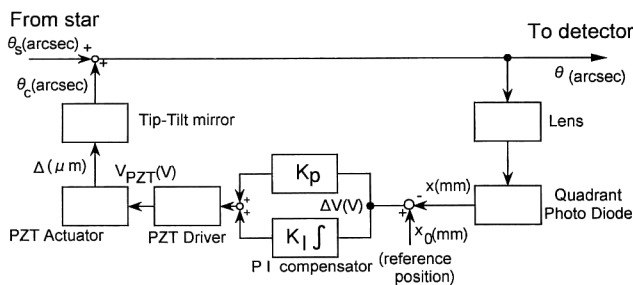


Fig. 3 The block diagram of the control system.

タを4本直列に接着して使っていて、鏡の傾きを最大4 mrad 変化させることができる。この傾斜角は恒星像位置に換算して約8.5秒角に相当する。

3. 実験観測結果

はじめに試作した tip-tilt 鏡の動作を確認した。鏡の2軸方向の直交性は、ミラーセルとピエゾアクチュエータを自作して組み合わせたため、角度で $3 \pm 1^\circ$ の誤差があった。次に、人工光源からの入射光路中にドライヤーで温度ゆらぎを与えて、イメージスタビライザを駆動して人工光源像の位置をスタビライズできることを確認した。実際の天体を用いたイメージスタビライザの性能評価は、1990年の夏、1991年の春と冬に国立天文台岡山天体物理観測所188cm望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けて行った。天体の画像は、スペックルカメラ拡大光学系を経て映像増倍管付き CCD カメラでビデオ録画された。中心波長450 nm で波長幅80 nm と中心波長700 nm で波長幅20 nm の干渉フィルターを用いて、2種類の観測波長帯で観測を行った。また、2対のフォトダイオードの差信号を使って恒星像の位置変動の時間スペクトルも取得した。

スペックルカメラ観測の解析は、ビデオテープに記録した恒星の拡大画像を FITS 形成^{16,17)} のデジタル画像データに変換し、通常の日体画像解析手法と同様に、空の明るさやダーク信号などのバックグラウンドの差し引きと画像の人工的なパターンの補正等を行った。非常に狭い視野を1/30秒露出で撮像しているので空の明るさとその非一様性はほとんど無視でき、ビデオカメラのダーク信号が主な画像のバックグラウンドであった。測定には、単独恒星の β UMa ($m_v=2.4$) と α Cas ($m_v=2.2$) を用いた。 m_v とは Vバンドでの天体のみかけの等級であり、Vバンドは天体の測光を行うための波長帯の一つで、中心波長550 nm、半値幅が84 nmの可視領域のものである。イメージスタビライザ使用時と非使用時のそれぞれについて恒星像の位置変動の時間スペクトルを比較すると、約130 Hz までの位置変動が補償されており、

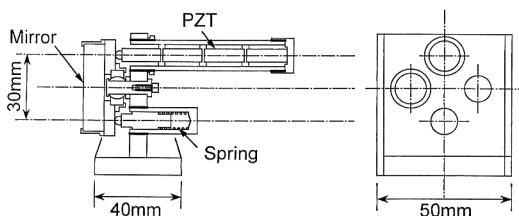


Fig. 4 The structure of the tip-tilt mirror.

東西方向と南北方向との差はほとんどみられなかった。東西方向の差信号の時間スペクトルを Fig. 5 に示した。ただし、フォトダイオードの光電流を電圧に変換する増幅器のところで一次遅れが生じるため、その時定数である200 Hz よりも高い周波数領域では本来の恒星像の位置変動の時間スペクトルを正確には表していないことに留意する必要がある。さらに、イメージスタビライザが使用可能な限界等級を見積もるために、波面傾斜センサーである4分割フォトダイオードの前にN.D.フィルターを入れて光量を人為的に減少させ、恒星像位置変動の時間スペクトルを測定した。その結果、Vバンドで3.45等級相当よりも明るい恒星では100 Hz以上の恒星像位置の変動を補正することができた。しかし、5.45等級に相当する場合は30 Hz程度のイメージ変動までが補正

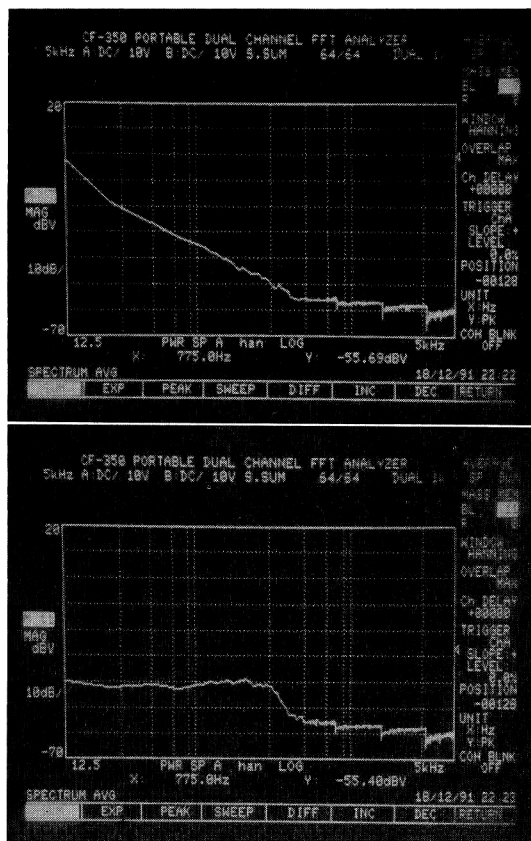


Fig. 5 The temporal power spectrum of image motion: image stabilizer was operated (below) and was not operated (above). The ranges of horizontal axes are from 12.5 Hz to 5 kHz on a log scale. Each vertical grids correspond to 30 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 90 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 700 Hz, 900 Hz, 1 kHz, 3 kHz.

可能であり、7.2等級に相当する場合は20 Hzより速いイメージの変動はまったく補正できないことがわかった (Fig. 6)。したがって、このシステムの限界等級はVバンドで4等級程度である。限界等級はフォトダイオードのS/N比で決定される。S/N比が低いと恒星像位置の測定誤差が大きくなり、正しくイメージスタビライザが動作しなくなる。筆者らの使用したフォトダイオードのノイズ電流は $8 \times 10^{-16} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、大気、望遠鏡、本装置のすべてを含めた光量スループットは約4%であった。システムの帯域幅をDC~130 Hzとすると、4分割フォトダイオードの各素子のS/N比は、3.45等級の恒星に対して250、限界等級の4等級に対して170、5.45等級に対して60、7.2等級に対して13となり、したがってシステムが十分動作するためにはS/N比が170程度必要である。また、5.45等級に対してS/N比が170程度得られる帯域幅は30 Hzとなり、筆者らの測定結果と矛盾しない。別の冷却方式を用いて検出素子をさらに冷却してダークノイズを低下させたり、高感度低雑音のアバランシェフォトダイオードなどを用いれば検出限界の向上が期待できる。また、ビームスプリッターの比を改善して、波面傾斜センサーのほうに多くの光量を反射させれば限界等級は向上するが、イメージスタビライザの後ろに設置された装置へのスループットが優先されるため、今以上の比率のビームスプリッターを使用することはできない。

次に、イメージスタビライザの恒星像縮小効果を調べた。450 nmと700 nmの波長について、イメージスタビライザをon/offしたときの60秒間のビデオ画像を用いて解析を行った。60秒間積分した恒星像のFWHM(半値全幅)をそれぞれ比較したところ、波長450 nmで1.2秒角から1.0秒角(83%, 17%減)、波長700 nmで1.0秒角から0.8秒角(80%, 20%減)に小さくなった。FWHMの測定誤差はイメージスタビライザonのとき0.05秒角程度、offのときには望遠鏡の恒星追尾制度も含めて0.1秒角程度、したがって恒星像の縮小相対誤差は両波長とも約13%である。

4. 大気乱流モデルによるシステムの性能評価

長時間積分した星のイメージサイズFWHM(秒角)は、Fried's coherence length r_0 (m)によって、 $\text{FWHM} = 2.0 \times 10^5 \lambda / r_0$ と表すことができる^{1,18)}。 λ (m)は観測波長である。イメージスタビライザをoffにしたときの60秒間の観測データから得られたFWHMの結果をこの式に適用すると r_0 を見積もることができ、波長450 nm (FWHM=1.0秒角)では $r_0=7.5$ cm、波長700 nm (FWHM=0.8秒角)では $r_0=14$ cmとなる。このときの r_0 の誤差はFWHMの誤差(~10%)に起因している。一方、大気ゆらぎがKolmogorov乱流モデルに従っていると仮定して、波面傾斜をすべて補償したときの恒

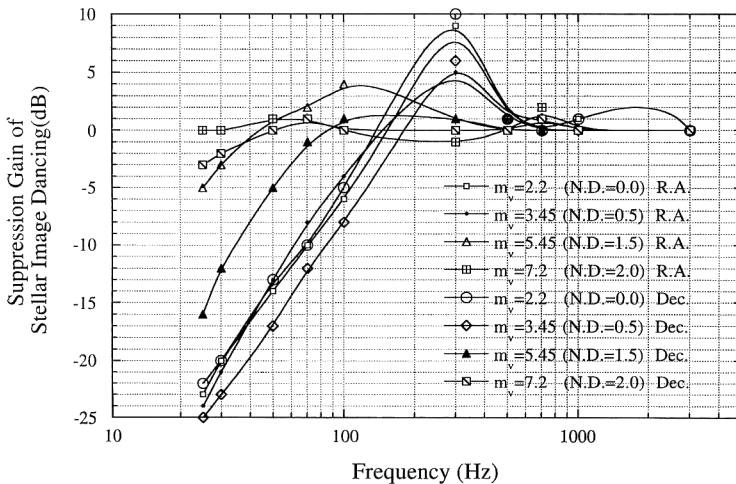


Fig. 6 The frequency characteristics of the image stabilizing gain, defined as the suppression factor of the amplitude of image motion. From each fitted curve, we can estimate system bandwidth. R. A. is an abbreviation for rightascension, which means the direction from east to west in the equatorial system, and Dec. is for declination, which means from north to south.

星像の縮小の割合を、望遠鏡口径とFried's coherence lengthの比 D/r_0 をパラメータとして見積もることができる (Fig. 7)。筆者らの得た結果を重ねてみると、恒星像の縮小の割合はKolmogorovモデルで推定された値に匹敵するものであった。しかし、若干縮小の割合が鈍くなっていることは確かである。この原因として、検出器のノイズによる恒星像位置の測定誤差、波面検出器が測定する波面の傾斜方向とtip-tilt鏡が補正できる波面傾斜の方向との相違、サーボ制御のフィードバックゲインを大きくしすぎてオーバーシュートが起ってしまった、などが考えられる。

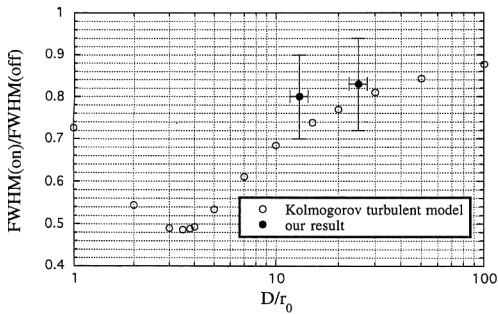


Fig. 7 The reduction of stellar size after tip-tilt correction versus D/r_0 . Open circles represents the estimation of reduced stellar size based on the Kolmogorov's turbulent model. Our measurements plotted by filled circles with error bars show that the image stabilizer system can reduce the stellar size nearly the same extent predicted by Kolmogorov's model.

5. まとめと今後の課題

今回の実験で使用したイメージスタビライザのプロトタイプ機は、大気乱流を Kolmogorov 乱流であると仮定した場合に達成できる理論限界近くまで恒星像を小さくすることが可能であることを実証した。しかし、光量の損失について十分な配慮がなされていない、波面傾斜検出素子の感度が低い使用可能な天体が明るい天体に制限されている、波面傾斜を十分に補償するだけの安定性と正確性をもっていないなど、前置光学系として総合的に十分な性能をもっているわけではない。現在、これらの点を改良した実用型イメージスタビライザを開発中である。限界等級は10等級をVバンドで実現することを目指している。また、常に十分な波面傾斜補償ができるようなサーボコントロールシステムを設計している。

最後に、実験観測をサポートしていただいた国立天文台岡山天体物理観測所の乗本祐慈氏をはじめとする所員の皆様に感謝の意を表します。

文 献

- 1) D.L. Fried: "Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures," *J. Opt. Soc. Am.*, **56** (1966) 1372-1379.
- 2) N. Takato, T. Aoki, M. Iye and Y. Taniguchi: "Measurements of Fried's coherence length using Hartmann method," submitted to *Pub. Astron. Soc. J.*

- 3) Space Telescope Science Institute Newsletter, **11** (1994).
- 4) A. Labeyrie: "Attainment of diffraction-limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images," *Astron. Astrophys.*, **6** (1970) 85-87.
- 5) R.K. Tyson: *Principles of Adaptive Optics* (Academic Press, Inc., 1991).
- 6) M. Shao and M.M. Colavita: "Long-baseline optical and infrared stellar interferometry," *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **30** (1992) 457-498.
- 7) "Adaptive optics," *J. Opt. Soc. Am.*, **67**, No. 3 (1977).
- 8) F. Roddier, J. Anuskiewicz, J.E. Graves, M.J. Northcott and C. Roddier: "Adaptive optics at the University of Hawaii I: Current performance at the telescope," *Adaptive Optics in Astronomy*, Kona Hawaii (1994), *SPIE*, **2201**, 2-9.
- 9) R.Q. Fugate: "Observations of faint objects with laser beacon adaptive optics," *Adaptive Optics in Astronomy*, Kona Hawaii (1994), *SPIE*, **2201**, 10-21.
- 10) R.M. Myers, A.P. Doel, C.N. Dunlop, J.V. Major, R.M. Sharples and A.J.A. Vick: "An astronomical AO system for use on a 4m-telescope at optical wavelengths," *Adaptive Optics in Astronomy*, Kona Hawaii (1994), *SPIE*, **2201**, 437-446.
- 11) J.M. Brase, J. An, K. Avicola, H.D. Bissinger, H.W. Friedman, D.T. Gavel, B. Johnston, C.E. Max, S.S. Olivier, R. Presta, D.A. Rapp, J.T. Salmon and K.E. Waltjen: "Adaptive optics at Lick Observatory: System architecture and operations," *Adaptive Optics in Astronomy*, Kona Hawaii (1994), *SPIE*, **2201**, 474-488.
- 12) G. Rousset, J.L. Beuzit, N. Hubin, E. Gendron, P.Y. Madec, C. Boyer, J.P. Gaffard, J.C. Richard, M. Vittot, P. Gigan and P. Lena: "Performance and results of the Come-On+ adaptive optics system at the ESO 3.6-meter telescope," *Adaptive Optics in Astronomy*, Kona Hawaii (1994), *SPIE*, **2201**, 1088-1098.
- 13) T. Sato, H. Ishikawa, O. Ikeda, S. Nomura and K. Uchino: "Deformable 2-D mirror using multilayered electrostrictors," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 3669-3672.
- 14) 西川 淳: "天文観測技術の最前線 (13), 光干渉計 光学望遠鏡による開口合成", *天文月報* 1月号 (1991) 38.
- 15) T. Nakajima, S.R. Kulkarni, P.W. Gorham, A.M. Ghez, G. Neugebauer, J.B. Oke, T.A. Prince and A.C.S. Readhead: "Diffraction-limited imaging. II. Optical aperture-synthesis imaging of two binary stars," *Astron. J.*, **97** (1989) 1510-1521.
- 16) P. Grosbol, R.H. Harten, E.W. Greisen and E.C. Wells: "Generalized extensions and blocking factors for FITS," *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, **73** (1988) 359-364.
- 17) R.H. Harten, P. Grosbol, E.W. Greisen and E.C. Wells: "The FITS tables extension," *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, **73** (1988) 365-372.
- 18) R. Racine and R. McClure: "An image stabilization experiment at the Canada-France-Hawaii telescope," *Pub. Astron. Soc. Pacific*, **101** (1989) 731-736.