

補償光学系の天文学への応用

藤 森 康 朝*

1. まえがき

1730年に、ニュートンが望遠鏡を自作し、天体観測に用いて以来、“たとえ大口径の望遠鏡を用いても、光量を集めはするけれど、大気の流れのために、解像力はたかだか口径 10 cm のそれと同程度である”といわれてきている。1953年に、バブコック¹⁾が始めて、“大気の流れのために生じた波面の歪を実時間で測定し補償する閉ループ帰還システムを用いると、大気の流れを無視できる。”と提案したが、高速、広帯域の光学素子技術、情報処理技術の未発達のため、1970年代まで実現されなかった。

このように、大気の流れを実時間で補償する手法を総じて、“補償光学系”と呼んでいる。補償光学系が具体化されてきた背景には、1) 天文学的側面；二重星等の地上からの分離、2) リモートセンシング的側面；人工衛星からの地上の撮影、3) レーザの伝播特性の改善；レーザ通信、レーザレーダ、レーザエネルギーの伝播、等の要求があった。

ここでは、大気の流れを補償して、星の像を良くするという範囲で、補償光学系について解説する。

2. 補償光学系の形式

補償光学系とは、光の伝播路中に生じた大気などの媒質の光学的不均一性を実時間で補償し、光の伝播結果を理想状態と等価にするものである。

現在、補償光学系として、遠方での結像特性を理想的とする伝播型のもと、観測位置での結像を問題とする結像型のものとの二種類考えられている。天文で用いられるものは後者のタイプであり、概略図1に示すようなものである。星など遠方光源からの光は、例えば平面波であるはずという仮定のもとに、擾乱波面の位相歪 ϕ または、位相歪 ϕ を変数としてもつ関数 $f(\phi)$ を検出して、位相歪補償器を駆動する信号 $G(\phi)$ になおして出

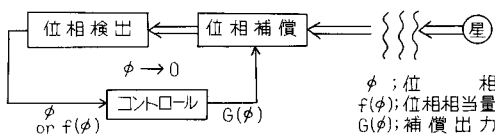


図1 結像型補償光学系ブロック図

* 東京芝浦電気(株)生産技術研究所 Yasutomo Fujimori: Adaptive Optics in Astronomy

力し、結果として閉ループコントロールで位相歪 ϕ を 0 に近づけるものである。

3. 擾乱波面の位相歪検出法

大気の流れによる波面の位相歪は、空間的にランダムで、歪量は数波長程度にまで達し、時間領域では数百 Hz にまで及ぶ。それゆえ、検出器には、時間、空間にわたって広いダイナミックレンジが要求される。特に、大気の流れは、光の位相のみならず強度をも乱すことがあるので、検出器は強度変化によって位相歪検出量に影響を与えない手法が用いられてなければいけない。

擾乱波面の位相歪検出法を分類すると、位相歪 ϕ を直接検出する直接法と、位相歪 ϕ に依存した測度量を検出する間接法とに分けられる。以下結像型の補償光学系で用いられる手法について説明する。

3.1 擾乱波面直接検出法 (シェアリング干渉法)²⁾

観測系に入射する波面の位相を知るために、波面の横ずらしをしたものと、もとの波面とを干渉させるシェアリング干渉法により、空間的な位相の差分を検出することにより、位相歪分布を知る手法がある。

入射光の強度変動に影響しないように、実際には交流型のシェアリング干渉法が用いられる。さらに、位相歪の2次元分布を知るために、互に直交した2方向に独立してシェアを与える2組のシェアリング干渉装置が必要である。図2には一方向にシェアを与える場合の原理図が示されている。平面波がレンズによって結像され、像面におかれた回転格子によってシェアと交流変調とをうけ、反対側におかれた複数の検出器で干渉縞を検出する。交流変調は、移動する回折格子による周波数シフト ($\Delta f = 2V/d$; V : 格子周速, d : 格子間隔) を用いている。位相歪量 δ と、検出信号 i との関係は

$$i \propto [1 + \gamma \cdot \sin(2\pi \cdot \Delta f \cdot t + \delta)]$$

となる。ここに γ は、入射光の波長幅等でできるビジビリティで1以下の値である。交流信号成分が零をクロ

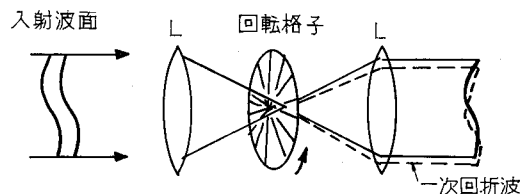


図2 交流型シェアリング干渉法による位相歪検出

スする時刻を回転信号と比較し、 δ を求めることができるので、光の強度変動が、変調周波数より低い場合には問題がない。

入射光量を考慮した、位相検出精度は、サンプリング時間 1 ms、集光径 25 cm、標的輝度 $10 \text{ w/m}^2 \cdot \text{sr}$ (例えば火星) で $\lambda/30$ 程度 (λ は可視域) であり、シェア最適量は 1.9 cm である。

3.2 擾乱波面間接測定法

位相歪量 ϕ に依存した、位相歪 ϕ が無いときに極値をとるような測度量を用いて、試行的な位相歪仮定 ϕ' を行うことにより、 ϕ' を ϕ に近づけていくものである。位相歪仮定 ϕ' は、少なくとも空間的に分割された開口の数だけ行なう必要がある。

測度量として、像の鮮明さを表わす像鮮鋭度関数 (image sharpness) を用いるものと、像の輝度分布と位相との関係を用いる尤も度関数 (maximum likelyhood) を用いるものがある。

3.2.1 像鮮鋭度関数を用いる方法³⁾

標的の形状は、あらかじめおおよそわかっているならば、どんな形でもよいが、位相歪のコヒーレンス半径*内に標的がはいっていることが必要である。

ミラー等は、像鮮鋭度関数として種々のものを考察しているが、その内で、像面での強度和を表わす

$$S_1 = \int I^2(x, y) dx dy$$

という形のもので、最も簡単に円形標的に適している。ここに I は像面におけるあかるさ分布である。開口を N 個の小開口にわけ、そのうちの i 番目の開口の位相補

* コヒーレンス半径; 望遠鏡で星などをみる場合には大気の状態により変化するが $1 \sim 10''$ のオーダーである。

償量を δ_i' だけ与えた時に S_1 の変化によって、その補償量の大きさと方向とが正しい方向であるかを知ることにより S_1 が極値をとるまで N 個の開口にわたってくりかえし δ_i' を与えていくことにより、真の位相歪 δ_i を知るものである。

3.2.2 尤も度関数を用いる方法⁴⁾

像の鮮鋭度関数の場合積分した量を測っているが、尤も度関数の場合には、像の輝度分布を測り、最初に仮定された位相歪をもとに計算された輝度分布との差から評価される尤も度関数の誤差を最小にするように次の仮定する位相歪を決定していく事で、仮定した位相歪を実際の位相歪に近づけていく手法である。

最初の仮定がわるいと、取れん性が悪いので計算するのに時間がかかるが、一度取れんしたあとでは、連続して補償する場合、数回のくりかえしで取れんするので、速度についての問題点はないと考えられる。

4. 波面位相補償器

位相歪は、開口内全体の位相歪傾斜と、小開口の傾斜と平均位相歪との3つに大別される。最初の位相歪傾斜が、方向変動に対応し、後の2つが分解能に対応する。このために、図3に示されるようなタイプの位相補償器が作られている。(a) はピストン型の個別鏡で平均位相歪を補償する。(b) はピストン+ティルト型であり、

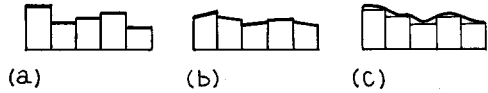


図3 位相補償器の構成

- (a) ピストン型個別鏡
- (b) ピストン+ティルト型個別鏡
- (c) 個別駆動される連続可変鏡

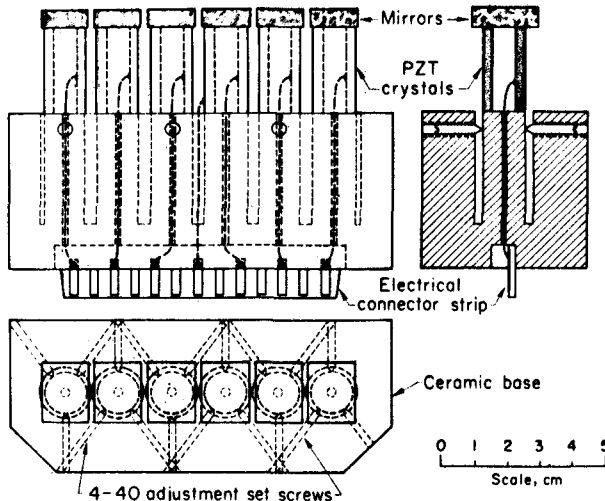


図4 ピストン型位相歪補償器の構成

表1 波面補償位相器

設計者	年度	駆動素子		寸法 (径, mm)	周波数応答 (kHz)	変位量 (μm)	駆動電圧 (V)
		新	型式				
Bridge	1974	7	Piezo bimorph	$\phi 15$	6.5	—	—
Feinleib	1974	21	Piezo block	$\phi 25$	1	± 1	± 2000
Hardy	1975	7	Piezo tube	$\phi 100$	0.7	± 3	± 1000
Pearson	1976	18	Piezo bimorph	$\phi 6$	14*	± 1	± 125
Pearson	1976	18	Piezo bimorph	$\phi 12$	50*	± 0.015	± 8.7
Buffington	1976	6	Piezo tube	12.5 \times 19	8.5	± 2.5	± 1000
Yellin	1976	53	Electro-static	$\phi 25$	3.8~8.0	± 3.0	± 80
Pearson	1977	37	Piezo disk	$\phi 100$	20~40	.56	300
Pearson	1977	37	Piezo tube	$\phi 108$	20	.50	400
McCall	1977	19	Piezo tubes	$\phi 50$	12	1.9	600

* 共振周波数

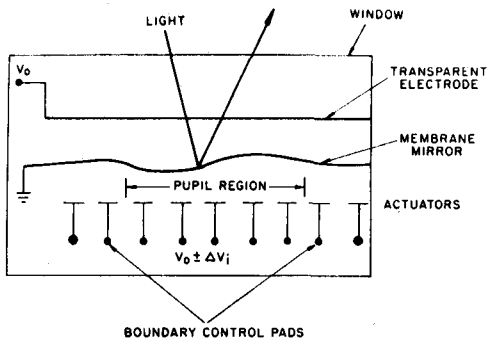


図5 電界駆動による薄膜鏡

小開口の位相傾斜も補償する。(c)は連続な薄膜ミラをピストン型素子で駆動することにより、(b)と同様な補償を行うが、駆動素子数は少なくすむ特徴をもつ

ている。実際には(a),(c)のものが作られており、各々を個別鏡補償器、連続鏡補償器という。

4.1 個別鏡補償器

天体望遠鏡に取付けられた一次元型の補償器を図4に示す。6個の円筒型の Piezo 素子の端面に矩形鏡を取付けたもので、 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ の変位量を与えることができる——素子の寸法は $1.25 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ である。

4.2 連続鏡補償器

薄膜鏡としてベリリウム等を用い、駆動源として Piezo 素子、油圧シリンダ、電界等が用いられる。素子数は一次元型で6~7ケ、二次元型で20~40ケである。現在つくられているものを表1に一覧表で示す。画像の補償用に作られたものは少なく、殆どがレーザー光用であるが、イエーリン等の作った電界駆動型の薄膜鏡(図5)は、製作性、安定性等にすぐれているので実用性がある。

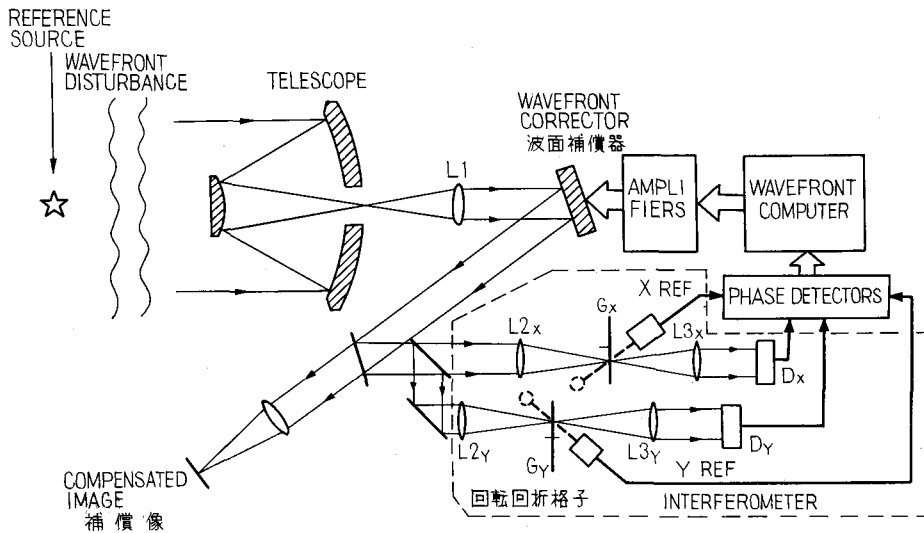


図6 シェアリング方式補償光学装置

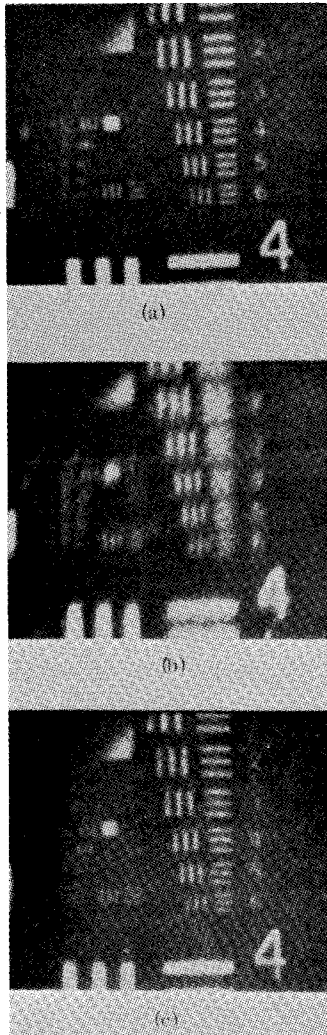


図 7 画像の補償例 (シェアリング干渉法とテストチャート近くの点光源による補償)
 (a) 擾乱のないときの回折限界像
 (b) 擾乱下の像
 (c) 補償された像

5. 補償例

ITEK 社では交流型のシェアリング干渉装置によって位相歪を検出するシステム (図 6) で画像の補償を行った。観測点から 300 m 離れた位置におかれた画像 (テストチャート) のそばに、He-Ne レーザを使った輝点をおき、レーザの光により位相歪を検出し画像の歪をも補償した例を図 7 に示す。(a) は擾乱のないときの光学系の回折限界像であり、(b) は p-p 値で 1.5λ の位相歪があるときの画像であり、(c) は、補償した画像である。(a) に比べると (c) は 88% まで回復している。30 cm の天体望遠鏡に取付けた実験が、像の鮮鋭度関

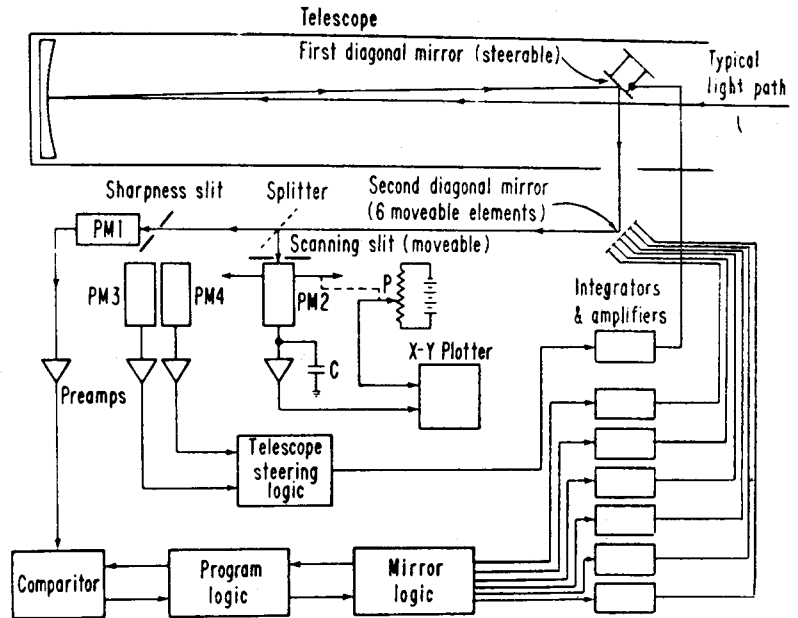


図 8 像鮮鋭度関数法での補償光学装置配置図

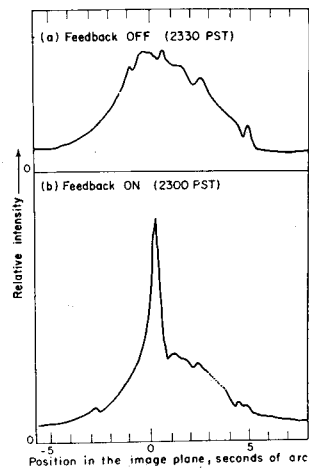


図 9 シリウスの観測例

- (a) 擾乱下の像分布
- (b) 補償され回折限界程度となった像分布

数を用いて行なわれている。図 8 に光学系と検出系が示される。入射光は望遠鏡の主鏡を通り、 $\pm 10''$ の方向変動を補償するステアリング鏡を通り、図 4 に示された位相補償器を通り、スリット上に結像する。方向変動は、PM 3, 4 の検出器で検出され、鮮鋭度は PM 1 で検出する。システムの応答は最大で 4 ms である。シリウスを観測した結果を図 9 に示す。補償した時には、ほぼ回折限界像となっている。さらに、二重星を分離した例を図 10 に示す。この手法では、少なくとも 100 ケの光電

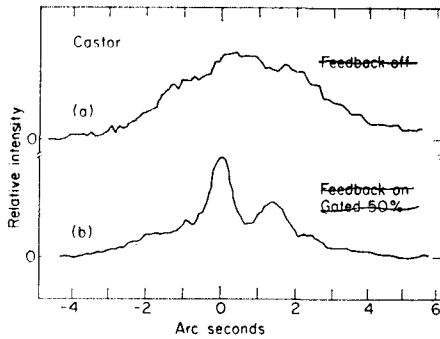


図 10 像の鮮鋭度関数を用いた二重星の分離⁶⁾

- (a) 擾乱下の像分布
- (b) 補償され分離された二重星像

子ぐらいの光量が取れんするために必要である。これは擾乱の相関時間が長くて、信号の積分時間が長くとれる夜間では7等星ぐらいの明るさに相当する。

6. 将来の展望

大気の擾乱の補償に、補償光学系を用いると、ほぼ回

折限界近くまでの性能を光学機械にもたすことができる。

天体用としては、シェアリング干渉法のように、開口を N ケに分割して、 N ケの検出素子に入射エネルギーをそれぞれ与えるやり方は低照度という条件から好ましくなく、入射エネルギーのほぼすべてを使う鮮鋭度関数を用いるものが適している。

大気の擾乱を単に補償という目的だけでなく、望遠鏡自体に起因する装置歪をも補償することが、望遠鏡の大口径化に伴い重要となってきている。

参 考 文 献

- 1) H. W. Babcock: J. Opt. Soc. Amer., **48** (1958) 500.
- 2) J. Feinleib et al.: SPIE **75**, (1976) 103.
- 3) R. A. Muller et al.: J. Opt. Soc. Amer., **64** (1974) 1200.
- 4) W. H. Southwell: J. Opt. Soc. Amer., **67** (1977) 396.
- 5) J. W. Hardy: J. Opt. Soc. Amer., **67** (1977) 360.
- 6) A. Buffington et al.: Science, **200** (1978) 489.

お 知 ら せ

東京天文台助教授公募

東京天文台では次の通り助教授一名を公募します。

東京天文台長 古在由秀

東京大学東京天文台では、長野県南佐久郡南牧村野辺山に、全国共同利用の大型宇宙電波望遠鏡を建設中で、1982年4月には一部運用開始の予定である。野辺山宇宙電波観測所では宇宙電波の観測的研究のほか、そのためのアンテナ、低雑音受信装置、VLBI、大容量分光分析、ソフトウェアなどの開発を重要な仕事としている。

募集人員：東京天文台野辺山宇宙電波観測所助教授 1名(野辺山勤務)

研究分野：電波天文学

仕事の内容：宇宙電波の観測的研究、観測装置の開発などに従事する。

着任時期：決定後なるべく早い時期

提出書類：履歴書(研究歴の説明を含む)、論文リストと主な別刷(共著の場合は役割分担を具体的に示すこと)、自薦の場合は研究上の抱負、他薦の場合は推薦書(いずれも簡潔に)

応募締切：1981年9月末日

宛 先：〒181 三鷹市大沢 2-21-1
東京天文台 青木信仰

連絡先：同上 田中春夫
Tel. 0422-32-5111 (内線 329)

その他：封筒に「助教授応募書類在中」と朱記すること。

東レ科学技術賞および研究助成候補者募集

上記について東レ科学振興会より本会あて推薦依頼が来ています。希望者は10月30日までに、学会庶務理事まで御連絡下さい。募集の要項はつぎのとおりです。

科学技術賞……(1) 学術上の業績が顕著なもの (2) 学術上重要な発見をしたもの (3) 重要な発明をしてその効果が大きいもの (4) 技術上重要な問題を解決して技術界への貢献が大きいもの、に対し金メダルと副賞300万円。

研究助成金……科学技術の基礎的な研究に従事し、その研究の成果が科学技術の進歩・発展に貢献するところが大きいと考えられる研究を行なっている研究者、またはそのグループに対し総額1億円前後、1件1,000万円程度。但し、とくに重要と認められる研究については、3,000万円程度まで助成が考慮されます。

贈呈期日は両方とも昭和57年3月の予定。