

・最新・

光学技術 ハンドブック

辻内 順平

黒田 和男

大木 裕史

河田 聰

小嶋 忠

武田 光夫

南 節雄

谷田貝豊彦

山本 公明

朝倉書店

の方が多いので最小2乗法を用いて各電極の電圧 C_j を決めることができる。

$$C = (Z_R^T Z_R)^{-1} Z_R^T Z_{DM} \quad (14.4.5)$$

ただし、 Z_R^T は j 番目の電極の応答関数 Z_R の転置行列である。

しかし、実際には補償鏡の変形は応答関数の完全な線形結合ではなく、他のエレメントの変形の影響により非線形な挙動をする可能性がある。したがって、式(14.4.5)をそのまま用いてフィードフォワードの制御を行っても、多くの場合所望の変形量を与えることができない。もちろん、これらを考慮して直接解を求める方法も考えられるが、エレメントの数が多くなると、複雑化し、特性データの収集時の誤差や、補償鏡の経時変化などにより制御が困難となる。そこで、ここでは、所望の変形量と実際に変形した量の差をフィードバックループにより補正し、誤差を漸近的に0に近付ける方法を紹介する³⁾。この方法は、補償量が時間的に滑らかに変化し、波面に不連続性がない場合有効であり、高速な追随性も確保することができる。

フィードバックの方法は、まず補償鏡の実際の形状を波面センサーで測定し、展開係数 Z_M を求める。所望の形状の係数 Z_c との差を計算し、この差を補正するのに必要な各電極の電圧の変化分 ΔC を次式によって計算し各電極の電圧にフィードバックをかける。これらの評価量はすべてゼルニケ係数で行う。

$$\Delta C = (Z_R^T Z_R)^{-1} Z_R^T (Z_c - Z_M) \quad (14.4.6)$$

ここで、

$$Z_M = \begin{bmatrix} Z_{M1} \\ \vdots \\ Z_{Mi} \\ \vdots \\ Z_{M24} \end{bmatrix}, \quad Z_c = \begin{bmatrix} Z_{c1} \\ \vdots \\ Z_{ci} \\ \vdots \\ Z_{c24} \end{bmatrix}, \quad \Delta C = \begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \vdots \\ \Delta C_i \\ \vdots \\ \Delta C_{19} \end{bmatrix} \quad (14.4.7)$$

一般にエレメント間の非線形な結合は小さいので、5~10回の繰返しで収束する。

以上まとめると、まず、第1近似として、補償鏡の変形は、各エレメントの変形の線形和で表され、各エレメントは制御電圧に対して線形に応答するものと仮定する。そのうえで、各エレメントの寄与を個別にあらかじめ測定しておく。この関係から、所望の変形量をもたらすための各エレメントに与えるべき電圧を計算する。その電圧でドライブしたときの形状を測定し、所望の形状との差を求め各エレメントの電圧を補正する。このフィードバックループを繰り返すことにより、高次の誤差を取り除くことができる。この方法は、ゆっくり変化する滑らかな

波面を補償する場合に有効である。(伊藤雅英)

文 献

- 1) P. Gosselin et al.: Proc. SPIE, 1920 (1993), 81-90.
- 2) 久保田 広: 光学, 岩波書店(1981).
- 3) X. Tian et al.: Appl. Opt., 34 (1995), 464-466.

14.5 補償光学の応用

14.5.1 天体応用

a. シーイング

望遠鏡の解像力の理論的な限界は、観測波長 λ と望遠鏡の直径 D の比で決まる。これは回折限界と呼ばれ、およそ $1.22\lambda/D$ rad である。例えば、直径 1 m の望遠鏡では回折限界は 5×10^{-7} rad、つまり星像半径で約 0.1 秒角である。ところが、実際に变形した量の差をフィードバックループにより補正し、誤差を漸近的に0に近付ける方法を紹介する³⁾。この方法は、補償量が時間的に滑らかに変化し、波面に不連続性がない場合有効であり、高速な追随性も確保することができる。

フィードバックの方法は、まず補償鏡の実際の形状を波面センサーで測定し、展開係数 Z_M を求める。所望の形状の係数 Z_c との差を計算し、この差を補正するのに必要な各電極の電圧の変化分 ΔC を次式によって計算し各電極の電圧にフィードバックをかける。これらの評価量はすべてゼルニケ係数で行う。

望遠鏡で星を観察すると、大気の乱れの影響で星像がふらふらと踊る。このふらつきを止める「イメージスタビライザー」²⁾ は補償光学の第一歩である。大望遠鏡では、開口内各部での乱れが重ね合わさるため、像がふやけて見える。光波面の位相が揃っていると見なせる空間スケールをフリード長 r_0 と呼ぶ³⁾。つまり、口径 D の望遠鏡のなかには、 $(D/r_0)^2$ 個のバラバラな光束があると考えればよい。このバラバラな光束を一つに揃えようというのが補償光学である。 r_0 は波長 λ の 1.2 乗に比例するので、波長の長い赤外線では大気のゆらぎはおおまかに見えるが、波長の短い可視光では r_0 は通常 10 cm 以下となり、口径 $D (> r_0)$ の望遠鏡で観測しても星像が $1.22\lambda/r_0 = 1$ 秒角程度となってしまう⁴⁾。ゆらぎを補償するには乱流層の平均風速を $v = 30$ m/s とすると、可視光では時間間隔 $r_0/v = 3$ ms より十分速く補償しなければならない。

b. 天文用補償光学システム

補償光学装置は一般に、波面測定系、波面補償鏡と、制御装置からなる(図 14.5.1)。

(i) 波面測定系

光波面の測定光学系としては、波面の1次微分を測る方法(シャック-ハルトマン法、シャーリング干渉法)と波面の2次微分を測る方法(曲率法)がある(図 14.2.2)。シャーリング干渉法は1970年代からアメリカにおいて防衛関係の応用で研究開発がされた実績がある。シャック-ハルトマン法⁵⁾は、望遠鏡光路中の瞳位置に置いたマイクロレンズアレーにより入射開口を分割し、個々のレンズがつくる多数の星像の配列位置を測定する方法である。波面の局所的勾配(1次微分)に応じて、点像の位置が横移動するから、この星像配列の歪みを測定して空間積分を施して、瞳の対応部分の波面誤差を測定する。天文台で試作したシャック-ハルトマンカメラは、約300点の計測により数 nm の測定誤差で、波面形状を測定できる⁶⁾。

曲率法⁷⁾は、望遠鏡焦点面前後のピンボケ画像の輝度分布から波面を構成する方法である。波面誤差がある場合、局所的波面曲率(2次微分)誤差に比例したピンボケ像の輝度ムラが生じる。焦点前後のピンボケ画像の差分から抽出した曲率誤差分布を空間積分することにより、波面を再生することができる。この場合、開口の縁での波面傾斜を境界条件としてボアソン方程式を解くことになる。この方法だと、シャック-ハルトマン法よりシステムが簡潔になる利点がある。2回積分を要する波面構成は誤差伝搬に弱いため、高次補正用システムよりは低次補正用システムに適している。

波面測定には光学系と並んで高感度の検出器が必要である。古くは光電子増倍管アレーが用いられた。最近はより量子効率の高いフォトダイオードアレー⁸⁾や高速低雑音 CCD⁹⁾が用いられる。天体を光源とする場合は光量が少ないため、波面測定系の感度がシステム性能の鍵となる。制御のレベルにもよるが、波面誤差の測定には光子統計誤差を考えただけでも測定時間内に数十フォトンは必要であり、波面測定に用いる光源星としてはあまり暗い星は使えない。このことが補償光学システムの実用上の制約になってきたが、後述するレーザーガイド星技術の開発でこの障害も乗り越えられつつある。

(ii) 波面補償鏡と制御系

反射鏡の鏡面を物理的に変形させて波面誤差を補償する可変形鏡と、液晶や非線形光学素子を用いて透過波面の位相を揃える方式があるが、天文学では波長依存性をもたない前者が使われている。形状を変化させる駆動素子としては積層電極素子を多数並べる方式(図 14.3.1)とバイモルフ圧電素子を並べる方式(図 14.3.2)が主流である。前者はシャック-

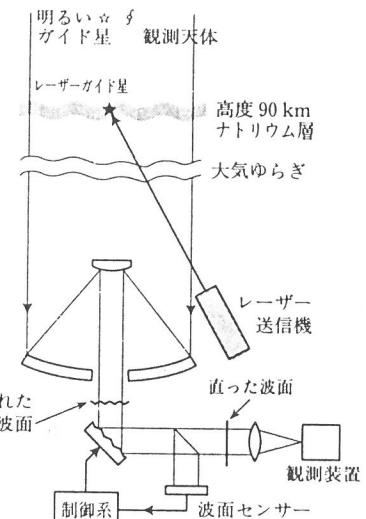


図 14.5.1 補償光学系

ハルトマン型波面センサーと組み合わせて高次の波面補正システムに、後者は波面曲率センサーと組み合わせて低次波面補正システムに用いられる。計算機の能力向上に伴い、高速制御自体は原理的な障害とはならなくなってきた。

c. 装置の具体例

1980年代末に、ヨーロッパ南天天文台が口径 3.6 m の望遠鏡に 19 個のアクチュエーターをもつ補償光学試作装置を取り付けて観測し¹⁰⁾、それまで分解できなかった 2 重星を分離することなどに成功した。

国立天文台は 1991 年度から 9 年計画でハワイ島マウナケア山頂に口径 8 m の大型光学赤外線望遠鏡すばるを建設した^{9,10)}(図 14.5.2)。すばる望遠鏡は、地球大気を透過する波長 $0.3 \mu\text{m}$ の近紫外線から $30 \mu\text{m}$ の中間赤外線までの電磁波により、遠宇宙を観測するための望遠鏡であり、主鏡の能動支持や補償光学の採用による高解像力を達成するため、新方式のドームにより望遠鏡まわりの空気の温度ゆらぎの抑制に工夫がなされている。カセグレン焦点用の第 1 期補償光学系は、近赤外線観測で 8 m 口径の回折限界に迫る解像力を実現することを狙ったシステムであり、36 素子のフォトダイオードアレーを用いた波面曲率センサーと 36 個のバイモルフビエゾ駆動素子を用いた可変形鏡による波面ゆらぎの補償を行う制御システムである¹¹⁾。通常のシーイング 0.6 秒角のときに 15 等級程度のガイド星を用いてこの補償光学系を使用すると、波長 $2.2 \mu\text{m}$ では星像直径を回折限界の 0.06 秒角にまで改善できることが試験により確かめられている。

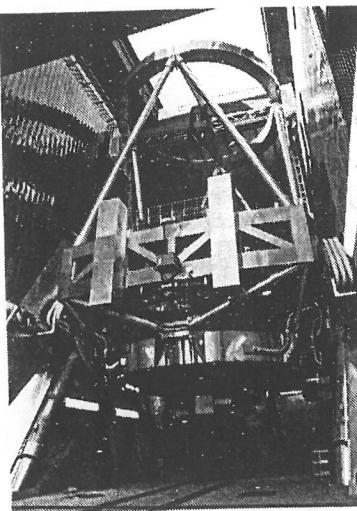
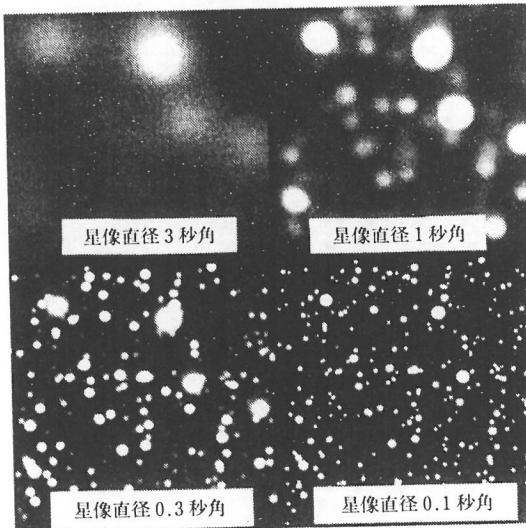


図 14.5.2 8m すばる望遠鏡

図 14.5.3 星像の大きさと星の見え方
(左上)典型的な3秒角の星像、(右上)1秒角の星像、
(左下)能動光学での0.3秒角の星像、(右下)補償光学
での0.1秒角の星像。視野は25秒角四方。

d. レーザーガイド星

補償光学が天文学で実用になるかどうかは、波面測定ができるかどうかにかかっている。観測したい天体が暗いときには、近くの明るい星を光源として用いるが、波面測定用の星と目的天体とは、大気のゆらぎが共通である必要がある。このためには、目的の天体と波面測定用の明るい星とは角度にして10秒角以内にあることが近赤外線では必要だが、そう都合良く明るい星があるわけではない。

そこで開発されたのが、任意の方向に波面測定用

の明るい人工星を作るレーザーガイド星技術である。地表から約90kmの上層大気中に、ナトリウム原子の密度が濃い厚さ10kmぐらいの層がある。ナトリウム原子を励起する波長589nmの強力なレーザーをこの層に当てれば、ナトリウム原子が発光して十分に明るい人工のレーザー星を任意の方向に作ることができる^{12,13)}。この技術の開発で、地上の望遠鏡でも大気のゆらぎを意識しないで観測することが可能となりつつある。

e. 補償光学の効能

補償光学による像改善の程度を D/r_0 の値によりシミュレーションしたのが図14.5.3である¹⁴⁾。国内の観測所での平均的な星像の大きさは岡山天体物理観測所で2.3秒角、木曾観測所で2.7秒角といわれている。条件の良いハワイのすばる望遠鏡では、補償光学の助けなしでも近赤外光で0.3秒角程度のシャープな星像が達成されている。補償光学を装備すると、波長2μmの近赤外線では0.06秒角、可視光では0.02秒角となる。図14.5.3では違いが判然としないが、補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合よりはるかに高い。光をより集中することができるため、以前より暗い天体が観測できるようになったり、分光観測でも分光器の入口のスリットを狭めて高分散化を実現することや分光器の小型化を図ることができる。

天体を観測するとき、観測装置の量子効率を ϵ 、望遠鏡の口径を D (m)、観測波長を λ (m)、焦点面での星像の大きさを θ (rad) とすると、背景光雑音が無視できる場合には、信号雑音比(SN比)は、 $\sqrt{\epsilon} D / (\lambda \theta)$ に比例する。1980年代に光検出器が乳剤写真からCCDなどの半導体撮像素子になったことにより、 $\sqrt{\epsilon}$ は約7倍になった。現在は4m級の望遠鏡が主流であるが、1990年代には「すばる」など8m級の望遠鏡が完成し、人類の目の大さき D は2倍になった。「すばる」ではその主鏡に能動光学方式を採用することにより、条件の良いときには $1/\theta$ を約3倍にすることができる。さらに補償光学を用いると、 $1/\theta$ が約30倍になる。これらのハイテク技術を取り入れたこれからの望遠鏡は、今までの望遠鏡の常識を大きく変えるものとなる。21世紀の観測天文学で能動光学や補償光学の果たす役割は大きい。(家正則)

文 献

- 1) H. W. Babcock: *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 65 (1953), 229-236.
- 2) 早野裕ら: 光学, 24 (1995), 91-96 (1995).
- 3) V. I. Tatarski: *Wave Propagation in a Turbu-*

- lent Medium
- 4) J. W. Harding: *SPIE Proc.*, 1114 (1989), 2,
 - 5) R. v. Shack and B. C. Platt: *J. Opt. Soc. Amer.*, 61 (1971), 656.
 - 6) T. Noguchi et al.: *Publ. Natl. Astron. Obs. Jpn.*, 1 (1989), 49-55.
 - 7) F. Roddier et al.: *Proc SPIE*, 976 (1988), 203.
 - 8) F. Merkle and N. Hubin: *SPIE Proc.*, 1542 (1991), 283.
 - 9) 大坪政司, 家正則: 光学, 28-4 (1999), 192-201.
 - 10) 家正則: 計測と制御, 37-12 (1998), 815-821.
 - 11) 高見英樹: 天文月報, 91 (1998), 466-473.
 - 12) L. A. Tompson and C. S. Gardner: *Nature*, 32 (1987), 229.
 - 13) バディ・マーチンら: パリティ, 6 (1991), 8.
 - 14) 家正則: 科学, 64-6 (1994), 354-357.

14.5.2 光加工応用

光加工への補償光学の応用としては、レーザー加工における焦点位置制御が提案されている。加工用レーザービームの経路の途中に形状可変鏡(deformable mirror)を挿入することによって、加工状況に応じてレーザービームの焦点位置を自由に変えることができ、従来プロセスバラメーターのなかで最も変化させづらい焦点位置変化の高速制御を可能にしたといわれている¹⁵⁾。

また加工用の高出力レーザーの熱による共振器の変形に対する補正を形状可変鏡を用いた補償光学によって行う方法が提案されている^{2,3)}。図14.5.4に示したように高出力固体レーザーにおける共振器の一方の鏡を、ガラスの厚板基板に穿って薄板を形成し、その背後に水を導入してピストンで圧力を印加して変形させることによって共振器内に生じる熱レンズの効果を補償している⁴⁾。(天神林孝二)

14.5.3 計測応用

形状可変鏡は、地上望遠鏡においては大気のゆらぎを補償して天体の観測精度を高くするといった応用が盛んであり、同じように水中での像観測に適用しようという応用が提案されている。海水の温度分布や透明な浮遊微生物といった有機物によって生じる光学的不均一さを補正するためであるが、具体的な観測対象や装置についての記述は未だ見当たらぬ⁵⁾。

形状可変鏡の計測への応用として、鏡面形状誤差を光干渉によって計測する応用が考えられる。例えばマイケルソン型光干渉計で非球面鏡を計測する場合、対物レンズによる球面波が非球面鏡によって反射されて戻るとき、非球面偏差分だけ平面波からの収差が残る。このとき非球面成分が急峻であると、

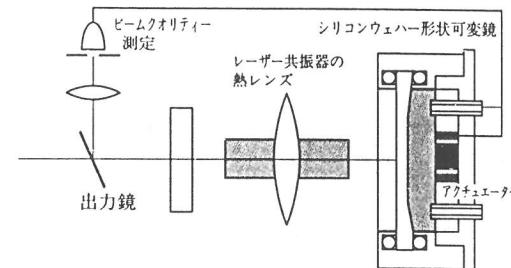


図 14.5.4 形状可変鏡によるレーザー共振器の熱レンズ効果の補正

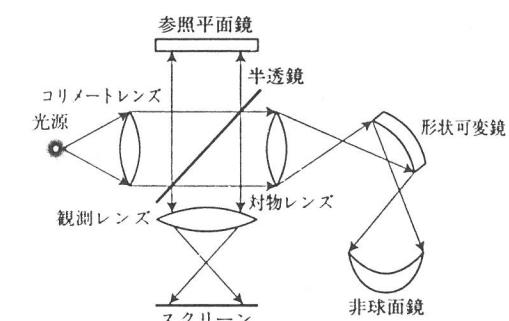


図 14.5.5 形状可変鏡を用いた非球面用干渉計の概念

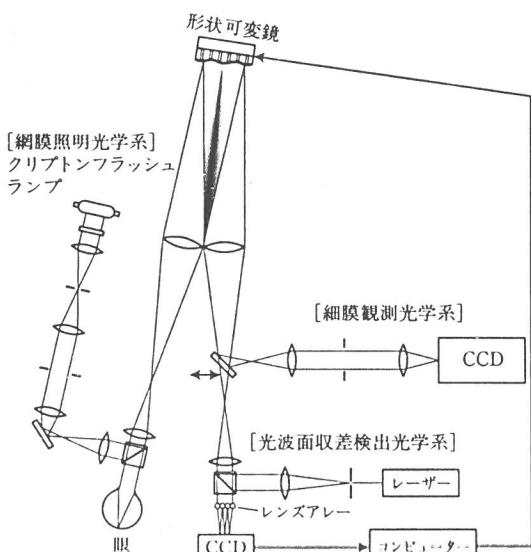


図 14.5.6 形状可変鏡を用いた網膜の観測と視力の補正

干涉縞が密になりすぎて観測不能となり、計測できない。このような場合、対物レンズと非球面鏡の間に形状可変鏡を挿入し、非球面偏差の一部を負担させると、干渉縞が観測可能となる。非球面鏡の形状誤差量は、観測された干渉縞からの形状誤差量と形状可変鏡の変形量とを加えたものになるため、形状